Google

This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at http://books.google.com/

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse http://books.google.com

3.10.4

LIBRARY

TRAITÉ

DE

PHYSIQUE ÉLÉMENTAIRE

Droits de traduction et de reproduction réservés

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.

TRAITÉ

DE

PHYSIQUE ÉLÉMENTAIRE

Charles (Alexandre) DE Éon.

CH. DRION ET É. FERNET

QUATRIÈME ÉDITION, ENTIÈREMENT REVUE

PAR

É. FERNET

PROFESSEUR AU LYCÉE SAINT-LOUIS, RÉPÉTITEUR A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

AVEC 679 FIGURES DANS LE TEXTE

PARIS

G. MASSON, ÉDITEUR

LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

PLACE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE

1872

Phys 229.10.4

1873, Jan. 4.
Farrar Fund.

APPENDICE

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LA THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

1. **Force vive. — Principe des forces vives.** — Lorsqu'on abandonne à lui-même un corps pesant, de masse m, sans vitesse initiale, sous la seule action de son poids p, cette force lui imprime un mouvement suivant la verticale : l'effet produit sur le corps, à un instant déterminé, peut s'envisager sous deux points de vue différents. D'une part, la force a accompli un certain travail moteur T, puisque le corps a parcouru, sous son action, un certain espace ; d'autre part, l'accomplissement de ce travail a communiqué au corps une certaine vitesse v ; cherchons une relation entre ces deux quantités. — Le travail moteur T est mesuré, en kilogrammètres, par le produit de la force p par le chemin parcouru h (23), c'est-à-dire qu'on a $T = p \times h$. Or le chemin parcouru h, dans ce mouvement uniformément varié, est lié à la vitesse v acquise à cet instant(5, *Remarque*) par la relation $v = \sqrt{2gh}$, ou $h = \frac{v^2}{2g}$. En remplaçant h par cette valeur, et $\frac{p}{g}$ par sa valeur m (14), il vient

$$T = \tfrac{1}{2} mv^2.$$

Telle est la relation qui existe entre le travail accompli par la force p, et la vitesse v qu'elle a imprimée à la masse m.

Le produit $\frac{1}{2}mv^2$ est ce que nous appellerons la *force vive* du corps à l'instant considéré (*). — Le résultat que nous venons d'obtenir peut alors s'énoncer comme il suit : *Le travail effectué à un instant donné, par le poids d'un corps* partant du repos et tombant sous cette seule

(*) On a d'abord donné, en mécanique, le nom de *force vive* au produit mv^2 ; il y a avantage à modifier cette convention, en comprenant dans la quantité ainsi définie le facteur $\frac{1}{2}$, comme nous le faisons ici, à l'exemple de la plupart des savants modernes.

action, *est égal à la force vive acquise par le corps à ce même instant.*

Il en est ainsi, non-seulement dans le cas particulier que nous venons de considérer, mais dans le cas général d'un système de points matériels, animés de mouvements quelconques et soumis à l'action de forces quelconques. — On démontre, en Mécanique, que *la somme des travaux de toutes les forces appliquées aux points d'un système matériel quelconque, pendant un temps déterminé, est égale à l'accroissement de la somme des forces vives pendant ce même temps.* — C'est l'énoncé du principe connu sous le nom de *principe des forces vives*, principe dont nous admettrons la généralité (*).

II. **Apparition de chaleur, accompagnant la disparition de la force vive de translation.** — Considérons un corps pesant, au moment où, étant tombé librement sous l'action de son poids, d'une certaine hauteur h, il possède une certaine vitesse v; si ce corps rencontre alors un plan horizontal inflexible, comme serait un plan de marbre absolument rigide, et s'il est lui-même parfaitement élastique, il remonte, suivant la verticale, à la hauteur h dont il était tombé, c'est-à-dire qu'il revient à son point de départ, où il arrive avec une vitesse nulle. — Envisageons séparément les phénomènes qui se sont produits dans chacun de ces deux mouvements en sens inverse.

Dans le mouvement de descente, le corps avait *acquis* finalement, au moment de rencontrer le plan rigide, une force vive déterminée $\frac{1}{2}mv^2$, égale au travail moteur ph, *dépensé* par son poids pendant le parcours de toute la hauteur de chute. — Dans le mouvement d'ascension, il est d'abord renvoyé par le plan rigide avec une vitesse égale et contraire à celle qu'il avait au moment de le rencontrer : il possède donc, à l'origine de ce mouvement de bas en haut, une force vive $\frac{1}{2}mv^2$, exactement égale à celle qu'il possédait au moment de rencontrer ce plan (**); or il *perd* successivement toute cette force vive, en parcourant de bas en haut le même chemin h, puisque sa vitesse redevient nulle lorsqu'il arrive

(*) Quand on considère, en particulier, un corps animé d'un mouvement de translation, la valeur de sa force vive doit être considérée comme une mesure de la grandeur des effets que son mouvement le rend capable de produire. L'expérience journalière montre, par exemple, que la violence du choc produit par un corps qui tombe, et qui vient rencontrer le sol, dépend à la fois de la grandeur de sa masse et de la grandeur de la vitesse qu'il a acquise; un marteau frappant sur un obstacle produit un effet qui dépend à la fois de son poids et de la vitesse qui lui est imprimée; les effets du projectile lancé par une arme à feu sont d'autant plus redoutables que sa masse est plus considérable et qu'il possède une vitesse plus grande, etc. — Ces faits et une multitude d'autres analogues montrent que, lorsqu'un corps est animé d'un mouvement de translation, la considération de la masse *seule*, ou de la vitesse *seule*, ne donnerait qu'une idée incomplète de sa puissance dynamique. La force vive, définie comme on vient de le faire, fournit une mesure précise de la puissance que l'action des forces productrices ou modificatrices du mouvement a accumulée dans le corps lui même.

(**) L'expression de la force vive ne contenant que le *carré* de la vitesse, sa valeur est indépendante du signe de la vitesse elle-même.

au haut de sa course; cette perte est représentée par la *production* d'un travail qui est égal, en valeur absolue, au travail résistant *ph* de son poids pendant l'ascension, c'est-à-dire à celui qui avait été dépensé pendant la descente. — En résumé, pendant la descente, *dépense de travail* et *production d'une force vive correspondante*; pendant l'ascension, *dépense de cette force vive* et *production d'un travail correspondant.*

Faisons maintenant tomber de la même hauteur un corps de même poids et de même masse, mais complétement dénué d'élasticité, en sorte que sa rencontre avec le plan rigide ne lui restitue aucune vitesse de bas en haut : au premier abord, il paraît y avoir alors annulation pure et simple de la force vive de translation que possédait le corps, et cela, sans que le plan prenne lui-même aucun mouvement. — Si donc il ne se produisait aucun autre phénomène concomitant, on serait amené à cette conclusion que, suivant la nature du corps qui tombe, sa rencontre avec un plan rigide pourrait donner lieu, soit à la conservation intégrale de l'effet produit sur lui par l'action de son poids pendant la chute, soit à l'annulation complète de cet effet.

Or, dans tous les cas de ce genre, outre la déformation permanente qu'éprouve généralement le corps, il se produit un nouveau phénomène, en apparence très-différent des phénomènes de mouvement. Toutes les fois qu'un corps, rencontrant un obstacle rigide avec une certaine vitesse, possède après la rencontre une vitesse nulle, ou simplement moindre que sa vitesse primitive, il y a un *dégagement de chaleur*, lequel est en général d'autant plus grand que la perte de force vive a été plus considérable. — On sait, par exemple, qu'une balle de plomb, lorsqu'elle rencontre la plaque de tôle d'une cible avec la vitesse que lui a donnée une arme à feu, ne prend, après le choc, qu'une vitesse insensible en sens contraire, car elle vient tomber presque au pied de la cible; à cette annulation de la force vive, correspond un dégagement de chaleur qui la rend brûlante, et qui peut l'amener jusqu'à la température de fusion du plomb. Les boulets, quand ils sont tirés à une faible distance sur des plaques de blindage auxquelles ils ne font subir que des déformations insensibles, éprouvent une élévation de température qui les porte à l'incandescence. — Dans l'exemple particulier que nous avions choisi d'abord, d'un corps perdant par le choc la force vive que lui avait communiquée son poids, le dégagement de chaleur n'est bien manifeste que pour des hauteurs de chute assez considérables : cependant il peut être constaté déjà pour des hauteurs de 3 ou 4 mètres.

III. **Notion générale de l'équivalence entre une quantité de chaleur et une quantité de force vive ou de travail.** — Les phénomènes du choc ne sont pas les seuls où l'observation montre la production d'une certaine quantité de chaleur, accompagnant la perte d'une certaine quantité de force vive ou du travail qu'elle représente.

On sait depuis longtemps que le frottement des corps les uns contre

les autres, en diminuant la vitesse dont ils sont animés, développe de la chaleur. Le frottement de la circonférence d'une roue de voiture, contre le frein qui la presse, la rend brûlante. Le frottement du moyeu contre l'essieu, lorsque celui-ci n'est pas suffisamment enduit de matière grasse, peut mettre le feu à la roue elle-même. C'est en frottant vivement l'extrémité d'une tige de bois dans la cavité d'un autre morceau de bois, que les peuples sauvages parviennent à allumer du feu, et c'est d'ailleurs par un procédé analogue que nous amenons l'extrémité d'une allumette chimique à la température de combustion du phosphore (*).

Les phénomènes de compression, et en particulier la compression des gaz, donnent lieu à un dégagement de chaleur, que l'on utilise dans le briquet à air ; dans ce dernier exemple, en particulier, ce dégagement de chaleur accompagne la perte de la force vive qu'avait communiquée au piston le travail accompli par la force qui l'avait mis en mouvement.

Inversement, l'observation d'une machine à vapeur en activité nous montre la dépense d'une certaine quantité de la chaleur produite par le combustible, s'accompagnant d'une production de force vive communiquée aux organes de la machine, ou d'un travail effectué.

En présence de ces divers résultats, on a dû se demander s'il n'existe pas, entre la quantité de chaleur produite ou dépensée, et la quantité de force vive ou de travail dépensée ou produite, un rapport déterminé. Ces deux quantités, de natures différentes, étant mesurables par l'expérience. peuvent être évaluées chacune à l'aide d'une unité de même espèce : si l'on trouve, dans l'étude des divers phénomènes, un rapport constant entre les deux nombres que l'expérience aura fournis, on en devra conclure qu'il y a toujours *équivalence* entre une certaine quantité de chaleur et une certaine quantité de force vive ou de travail. — Nous allons indiquer quelques-unes des expériences qui ont permis d'arriver à ce résultat.

IV. **Transformation du travail en chaleur. — Expériences de M. Joule sur les phénomènes de frottement.** — On doit à M. Joule, de Manchester, un grand nombre d'expériences dans lesquelles on a employé une quantité déterminée de travail à produire, par le frot-

(*) A ces observations vulgaires, il convient d'ajouter la belle expérience exécutée dès 1798 par Rumford, dans la fonderie de canons de Munich qu'il dirigeait. — Frappé de la haute température qui se produit dans le forage du bronze, il fit construire un appareil dans lequel un pilon d'acier trempé, mis en mouvement autour de son axe par deux chevaux, venait frotter contre les parois d'une cavité pratiquée dans une pièce de fer; le tout était plongé dans une caisse de sapin, contenant environ 10 litres d'eau froide. Au bout de deux heures et demie, l'eau était en peine ébullition. — Rumford montra l'impossibilité d'attribuer la quantité énorme de chaleur dégagée à la production de la limaille, dont la chaleur spécifique est la même que celle du métal, et qui était d'ailleurs en quantité assez faible (54 grammes). Il fut conduit à cette conclusion, bien digne de remarque si l'on se reporte à l'époque où elle fut formulée, que le dégagement de chaleur ne devait être qu'un phénomène *de mouvement ;* c'est la conclusion à laquelle sont arrivés également les savants modernes, comme nous le verrons plus loin.

tement de corps solides ou liquides les uns contre les autres, une quantité de chaleur dont on déterminait également la valeur. Les parties principales de l'appareil sont les suivantes :

Deux masses de plomb E, E (fig. *a*), de poids égaux, abandonnées sous l'action de la pesanteur, impriment un mouvement de rotation aux

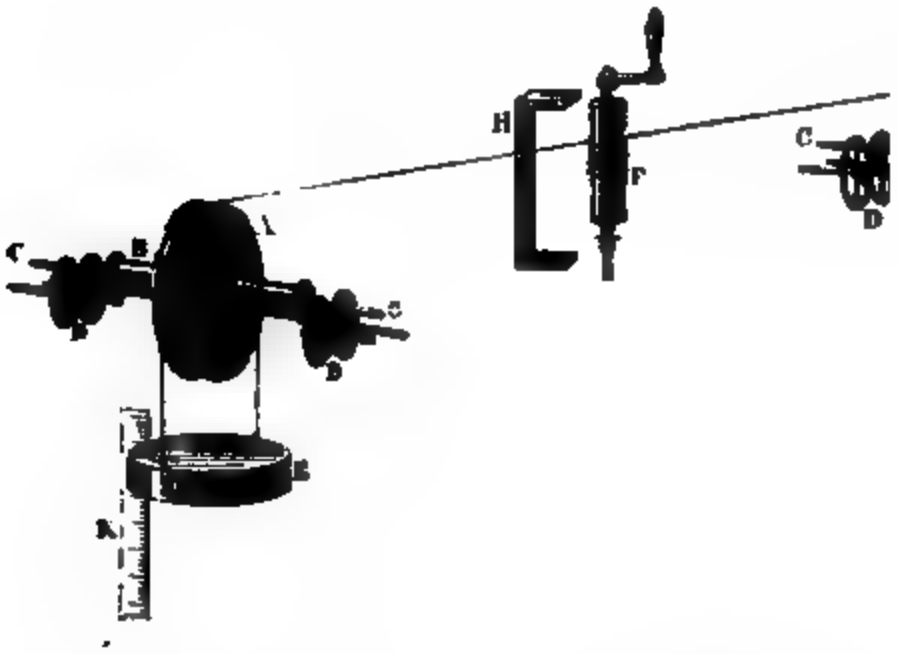


Fig. a.

axes B, B de deux poulies A, A ; les gorges de ces poulies portent des fils qui viennent s'enrouler sur le cylindre de bois F et l'entraînent dans leur mouvement ; enfin, sur l'axe vertical, autour duquel tourne le cylindre, sont montées des palettes qui doivent se mouvoir au milieu d'une masse d'eau ou de tout autre liquide, contenue dans le vase G (fig. *b*). — Le frottement de l'eau, tant sur elle-même que sur les pièces solides de l'appareil, a pour effet de diminuer la vitesse que les poids moteurs tendraient à imprimer au système : à cette perte de force vive, correspond une élévation de température du vase G et de son contenu, c'est-à-dire la production d'une certaine quantité de chaleur.

Fig. b.

Il s'agit maintenant d'évaluer, d'une part la quantité de chaleur qui a été dégagée, d'autre part le travail moteur qui a été consommé dans une expérience. — L'évaluation de la quantité de chaleur dégagée s'effectuait en déterminant, avant l'expérience, la température du liquide au moyen d'un thermomètre très-sensible (*), et effectuant ensuite la même détermination

(*) Le thermomètre employé par M. Joule donnait les centièmes de degré de l'échelle Fahrenheit.

après avoir laissé les poids descendre depuis le point le plus haut de leur course, jusqu'au sol du laboratoire (*). La valeur de l'élévation de température du liquide et des pièces solides permettait de déterminer, au moyen des chaleurs spécifiques connues (livre II, chap. IX), la quantité de chaleur dégagée Q, évaluée en calories. — Le travail effectué pendant la chute des deux poids était égal au produit de leur valeur totale 2P évaluée en kilogrammes, par la hauteur totale de chute H évaluée en mètres. Mais il faut remarquer que ce travail $2P \times H$ n'avait pas été employé tout entier à produire l'échauffement que l'on vient d'évaluer : en effet, chacun des poids E, au moment où il vient rencontrer le sol avec une certaine vitesse v, perd par le choc la force vive qu'il possédait ; on observait donc, au moyen de règles graduées, la vitesse v du mouvement sensiblement uniforme des poids, dans les instants qui précédaient le choc, et, en remarquant que la masse totale des deux poids moteurs est $\frac{2P}{g}$, on connaissait ainsi complétement la force vive perdue par le choc, savoir $\frac{P}{g}v^2$. Enfin on avait déterminé, par une expérience spéciale, la valeur du travail employé à vaincre les frottements des pièces extérieures au vase calorimétrique, dans les conditions mêmes de l'expérience principale : désignons par t ce travail, dont la valeur était d'ailleurs toujours assez faible. On voit que, pour avoir l'expression définitive du travail T qui avait été employé à dégager la quantité de chaleur Q, il suffisait de retrancher, du travail total des poids $2 \times PH$ la somme de la force vive perdue par le choc sur le sol $\frac{P}{g}v^2$ et du travail t.

La moyenne des expériences fournit, pour le rapport $\frac{T}{Q}$ des deux quantités ainsi calculées, en employant l'eau et le laiton, le nombre 424,9. — En remplaçant l'eau par le mercure, et le laiton par le fer, on trouva 425,4. — En remplaçant l'arbre à palettes par un anneau de fonte qui frottait sur un cône de fonte, et plongeant le tout dans le mercure, on trouva 426,4. — Enfin, en exerçant sur une masse d'eau une pression déterminée, qui la forçait à traverser un diaphragme d'argile poreuse, et observant l'échauffement produit, on obtint le nombre 425,0. — Tous ces nombres présentent entre eux des différences bien peu considérables, eu égard aux difficultés pratiques d'expérimentation (**) : cette concordance permet d'affirmer que, dans les phénomènes de frottement, le

(*) Pour rendre l'élévation de température plus sensible, on renouvelait cette expérience jusqu'à vingt fois. — Les frottements étaient d'ailleurs augmentés par une disposition qui consistait à placer dans le liquide des cloisons verticales fixes, portant des ouvertures simplement suffisantes pour laisser passer les palettes mobiles.

(**) M. Favre et M. Hirn, ont obtenu, par des procédés tout différents, des nombres qui s'écartent peu de ceux de M. Joule.

dégagement d'une quantité de chaleur égale à une calorie correspond à la dépense d'une quantité de travail constante, et égale, en nombre rond, à 425 kilogrammètres.

Ce nombre est ce que nous nommerons, dès maintenant, l'*équivalent mécanique de la chaleur*, ou ce qu'on pourrait appeler plus correctement l'*équivalent mécanique de la calorie*. — Il nous reste à vérifier que sa valeur reste encore la même dans des phénomènes d'un ordre tout autre.

V. **Transformation de la chaleur en travail mécanique. — Expériences de M. Hirn, sur la machine à vapeur.** — Considérons une machine à vapeur, à un moment où elle fonctionne d'une manière régulière, et examinons les phénomènes qui s'y produisent pendant un mouvement de va-et-vient du piston. Le cylindre reçoit une certaine quantité de vapeur, laquelle provient d'un égal poids d'eau, emprunté au condenseur par la pompe alimentaire et vaporisé dans la chaudière; cette vapeur, après avoir fait parcourir au piston la longueur du cylindre, sous l'action de la pression qu'elle exerce sur lui, retourne au condenseur, où elle se liquéfie et reprend la température du condenseur lui-même. L'eau de condensation revient donc exactement à sa température primitive. Si la machine est arrivée à une période d'activité normale, la température maintenue dans la chaudière sous l'action du foyer demeure constante, et il en est de même de la température maintenue dans le condenseur par l'action de l'eau froide injectée.

La mesure des dimensions du cylindre permet de calculer la quantité de vapeur qu'il reçoit, pour un nombre déterminé de coups de piston : par suite, connaissant la température et la pression de cette vapeur dans la chaudière, on en déduit la quantité de chaleur Q, qui est consommée en un temps donné, pour transformer en vapeur l'eau empruntée au condenseur (380). D'autre part, la mesure de la quantité d'eau froide qu'on doit injecter dans le condenseur pendant le même temps, pour y maintenir une température constante, donne la quantité de chaleur absorbée par cette eau (364), c'est-à-dire abandonnée par la vapeur qui s'y condense. Or on trouve que cette dernière quantité a toujours une valeur Q′ moindre que Q, c'est-à-dire que la vapeur ne rapporte pas au condenseur toute la chaleur qu'elle avait prise à la chaudière. — Ce résultat est facile à concevoir, d'après les notions qui précèdent. En effet, dans son trajet entre la chaudière et le condenseur, la vapeur a agi sur le piston et a donné lieu à une certaine production de travail; dès lors, la *perte de chaleur* qu'elle éprouve n'est que le résultat d'une transformation de chaleur en travail mécanique. — Il reste donc à évaluer le travail produit, pour le comparer à la chaleur dépensée : c'est ce qu'a fait M. Hirn, de Colmar, en opérant, comme nous allons l'indiquer, sur des machines puissantes, installées pour les besoins d'une grande industrie.

Pour évaluer le travail effectué par la vapeur, M. Hirn déterminait la

pression dans le cylindre, en divers points de la course du piston : c'est ce que permet l'appareil connu sous le nom d'indicateur de Watt. Si ces points sont suffisamment voisins les uns des autres, on peut supposer que le piston passe de l'un à l'autre sous l'action d'une force constante, égale à la différence des pressions qui s'exercent à ce moment sur ses deux faces, ce qui donne le travail accompli par la vapeur entre ces deux points : une série de termes semblables donne le travail pendant la course tout entière, et par suite le travail total pendant l'intervalle de temps que l'on aura choisi pour l'expérience. — Soit T ce travail, évalué en kilogrammètres, et $Q - Q'$ la différence entre la chaleur prise à la chaudière et la chaleur cédée au condenseur (*). Les expériences de M. Hirn ont fourni, pour valeur moyenne du quotient $\frac{T}{Q-Q'}$, le nombre 415 : résultat dont l'accord avec ceux de M. Joule est plus grand qu'on n'aurait pu l'espérer, quand on songe aux difficultés et aux causes d'erreurs de pareilles expériences.

VI. **Conclusions relatives à l'équivalent mécanique de la chaleur.** — Nous ne multiplierons pas davantage les exemples de déterminations numériques de l'équivalent mécanique de la chaleur : les mesures effectuées par des physiciens, sur les quantités de travail et les quantités de chaleur qui apparaissent comme se substituant les unes aux autres, dans les phénomènes les plus divers, ont donné toujours entre ces quantités un rapport très-voisin de celui qui avait été indiqué par M. Joule, savoir 425. Nous considérerons donc comme démontrées, par l'ensemble des déterminations effectuées, les deux conclusions suivantes :

1° Une certaine quantité de chaleur, consommée sans déterminer une élévation de température dans les corps auxquels elle a été fournie, produit une certaine quantité de travail, savoir 425 kilogrammètres par calorie.

2° Une certaine quantité de travail, dépensée sans effectuer aucun travail mécanique apparent, produit une certaine quantité de chaleur, savoir $\frac{1}{425}$ de calorie par kilogrammètre.

Cette *équivalence*, entre la chaleur dépensée ou produite, et le travail produit ou dépensé, doit être considérée comme un résultat expérimental, indépendant de toute idée théorique sur la nature de la chaleur elle-même. Nous allons chercher à faire concevoir maintenant comment la *théorie mécanique de la chaleur* établit, entre les phénomènes de la chaleur et ceux du mouvement, une identité complète.

VII. **La chaleur envisagée comme un mode de mouvement.** — Si l'on essaye de faire une énumération complète des phénomènes qu

(*) Il est bien entendu qu'on a fait subir à ces nombres les corrections dues aux pertes de chaleur par rayonnement ou par conductibilité.

apparaissent, au moment où un corps possédant une certaine vitesse vient rencontrer un obstacle rigide et fixe, on reconnaît facilement que ces phénomènes se réduisent, en faisant toujours abstraction des déformations permanentes que le corps peut éprouver, à trois effets, que nos sens nous font apprécier comme très-différents au premier abord.

1° Le corps prend un mouvement de translation, dans une direction différente de sa direction primitive, mouvement dans lequel on retrouve, mais seulement en partie, la force vive du mouvement primitif.

2° Il se produit un son perceptible à l'oreille, c'est-à-dire un mouvement vibratoire des diverses parties du corps. — On doit donc regarder une partie de la force vive primitive de translation comme ayant été employée à accomplir un travail, en écartant les diverses parties du corps des positions relatives où leurs actions mutuelles tendaient à les maintenir. Cet écart une fois produit, ces mêmes actions ramènent les points écartés vers leurs positions relatives initiales, positions qu'ils dépassent en vertu de leur vitesse acquise, et c'est ainsi que se produit ce mouvement vibratoire qui est la cause productrice du son (633). Ce mouvement, qui durerait indéfiniment dans le vide, s'éteint plus ou moins rapidement dans l'air, parce que la force vive des points matériels vibrants se transmet successivement aux molécules de l'air, qui ont une certaine masse, et qui ne peuvent acquérir de vitesse qu'à la condition d'emprunter de la force vive au corps vibrant lui-même.

3° Enfin nous avons vu qu'il y a un dégagement de chaleur, plus ou moins considérable suivant les circonstances, mais toujours sensible, phénomène qui correspond comme nous l'avons montré, à la disparition d'une partie de la force vive de translation.

L'hypothèse qui sert de base à la théorie mécanique de la chaleur consiste à considérer ce dernier effet comme tout à fait semblable au second, c'est-à-dire à envisager l'élévation de température d'un corps comme la production d'un mouvement vibratoire, imprimé aux éléments qui le constituent. — La modification thermique que l'expérience accuse dans le corps ne constituera plus seulement alors un phénomène d'une nature particulière, *équivalent* au phénomène mécanique qui l'a produit ; ce sera un phénomène mécanique de même nature, à savoir l'accumulation, dans l'ensemble des éléments du corps, d'une somme de forces vives *égale* à la force vive qui a été dépensée pour produire cet effet.

En considérant les phénomènes thermiques sous ce point de vue, non-seulement les transformations du travail en chaleur ou de la chaleur en travail apparaissent comme possibles, mais l'équivalence entre la quantité de la chaleur dépensée ou produite et la quantité de travail produit ou dépensé n'est qu'une conséquence nécessaire du principe général de la *conservation de la force vive*, principe qu'un grand nombre d'esprits éminents regardent comme un axiome, et qui a pu servir pour démontrer *a priori* tous les résultats de la théorie actuelle. — Nous

allons examiner maintenant comment cette théorie s'accorde avec les autres faits connus.

VIII. **Transmission de la chaleur par rayonnement.** — Lorsqu'on introduit un corps, à une température quelconque, au milieu d'autres corps à une température plus basse, l'expérience montre que sa température s'abaisse, tandis que celle des autres corps s'élève. On dit généralement alors qu'il y a transmission de chaleur du corps le plus chaud aux corps les plus froids ; mais il est clair qu'on ne peut voir dans cette locution que l'énoncé pur et simple du résultat, sans aucune indication de la manière dont le passage de la chaleur a pu s'effectuer.

En étudiant ce phénomène, connu sous le nom de rayonnement, les physiciens ont reconnu, dans la chaleur rayonnante, un ensemble de propriétés absolument semblables à celles de la lumière : la conclusion de tous les travaux modernes sur ce sujet est que l'une et l'autre sont dues à la production d'un mouvement ondulatoire, dans l'espace qui sépare des corps à des températures différentes. — Cette conclusion, aujourd'hui incontestée, vient prêter un appui à l'hypothèse qui considère la chaleur comme un mouvement, en montrant qu'elle permet de concevoir le phénomène de la transmission elle-même. Dans cette hypothèse, l'abaissement de température du corps le plus chaud n'est qu'une diminution dans la somme des forces vives des mouvements vibratoires de ses éléments : l'élévation de température des corps les plus froids est un accroissement de force vive dans les mouvements vibratoires qu'ils possédaient : quant à l'intermédiaire par lequel a pu s'effectuer cet échange, c'est le mouvement vibratoire imprimé au milieu interposé. La transmission de la chaleur par rayonnement devient alors analogue à la transmission du mouvement vibratoire d'un corps sonore au milieu qui l'environne.

Une différence essentielle distingue cependant les mouvements vibratoires qui constituent le son, de ceux que nous considérons ici comme constituant la chaleur ou la lumière : le son ne se transmet pas dans le vide (634) ; il en est autrement de la chaleur et de la lumière, qui se propagent dans les espaces vides de toute matière pondérable (826). On a donc été conduit à admettre que les mouvements vibratoires calorifiques et lumineux se propagent par l'intermédiaire d'un milieu impondérable, l'*éther*, répandu aussi bien dans le vide que dans l'air et dans les corps perméables à la chaleur et à la lumière.

IX. **Effets produits par l'accumulation ou la disparition d'une certaine quantité de chaleur, dans les divers corps.** — L'expérience a montré que l'accumulation ou la disparition d'une certaine quantité de chaleur dans un corps quelconque, solide, liquide ou gazeux, produit, en général, à la fois une *variation de volume*, que l'on exprime en disant qu'il se dilate ou se contracte, et une *variation de tempéra-*

ture, c'est-à-dire une modification de ses propriétés, appréciable soit à nos sens, soit aux instruments thermométriques.

Si la température atteint certaines valeurs, déterminées pour chaque corps, une nouvelle modification dans la quantité de chaleur qu'il possède produit un *changement d'état*, c'est-à-dire le passage de l'état solide à l'état liquide, de l'état liquide à l'état gazeux, ou l'un des passages inverses.

Enfin, si l'on répète les mêmes expériences sur un même corps, en faisant varier les pressions qui s'exercent sur sa surface, on constate que les valeurs des changements de volume ou de température, produits par une quantité de chaleur déterminée, sont modifiées. De même, quand on fait varier la pression, la température à laquelle s'effectue tel ou tel changement d'état éprouve des variations plus ou moins considérables.

Toutes ces particularités, minutieusement étudiées par les physiciens, quant à l'évaluation numérique des grandeurs qui interviennent dans les phénomènes, sont restées longtemps sans relation mutuelle apparente. — La théorie mécanique de la chaleur fait concevoir quels sont les liens qui doivent réunir entre elles soit les propriétés diverses d'un même corps, soit les propriétés analogues de corps différents. En envisageant l'ensemble des faits sous un jour nouveau, elle est venue montrer comment les mesures anciennement effectuées suffisent pour résoudre un certain nombre des questions qu'elle soulève, elle a pu indiquer enfin quelles sont les données qu'il faudrait posséder encore pour achever de résoudre les autres. — C'est ce que nous allons essayer de montrer, au moins pour les phénomènes les plus simples.

X. **Effets de la chaleur sur un gaz soumis à une pression constante. — Travail extérieur. — Variation de la chaleur sensible.** — Supposons que l'on fournisse de la chaleur à une masse gazeuse dans des conditions telles, que la pression supportée par le gaz demeure constante ; soit, par exemple, une masse d'air contenue dans un ballon de verre A (fig. *c*), et séparée de l'air extérieur par une bulle de liquide B, contenue dans un tube horizontal. L'expérience constate à la fois : 1° un accroissement de volume du gaz, mesuré ici par le volume de la portion du tube BB′ que la bulle liquide parcourt en se déplaçant (*) ; 2° une élévation de température du gaz, que l'on peut constater en plaçant un thermomètre sensible *t* au sein de la masse. — Ces deux effets sont simultanés ; examinons séparément chacun d'eux.

1° L'accroissement de volume du gaz consiste dans un déplacement des parois de l'enceinte qui le contient, et qui sont soumises extérieurement

(*) Nous considérons comme négligeable l'accroissement de volume dû à la dilation du verre. Il serait facile d'en tenir compte, comme nous l'avons fait dans un grand nombre de cas ; il s'agit d'ailleurs ici, comme on va le voir, non pas d'une expérience destinée à fournir des mesures précises, mais d'une disposition qui nous permette d'exposer, d'une manière simple, les résultats obtenus par des méthodes plus compliquées.

à la pression atmosphérique. Il y a donc un travail accompli ; c'est ce qu'on nomme le *travail extérieur*. — Dans la disposition simple que présente l'expérience actuelle, la valeur numérique de ce travail s'obtiendra immédiatement en multipliant la pression de l'atmosphère sur une surface égale à la section du tube (pression évaluée en kilogrammes), par la longueur du chemin parcouru par la bulle (longueur évaluée en mètres) (*). — Ce travail est l'équivalent d'une quantité de chaleur que l'on pourra

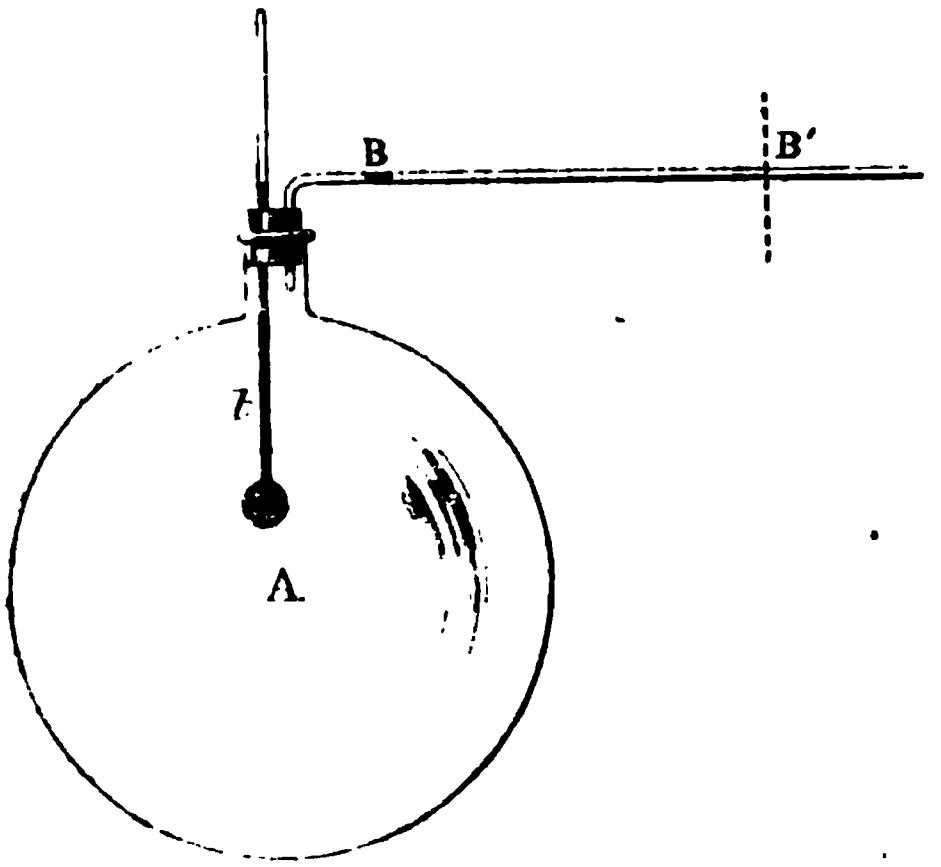


Fig. c.

évaluer en calories, en admettant la valeur 425 pour l'équivalent mécanique de la chaleur, et multipliant par $\frac{1}{425}$ le nombre de kilogrammètres obtenu pour le travail extérieur.

2° L'élévation de la température du gaz, envisagée au point de vue de la théorie actuelle, consiste dans un accroissement de force vive dans les

(*) L'expression du travail extérieur accompli peut encore être présentée sous une autre forme. Soit s la section du tube, b la longueur BB' dont la bulle se déplace, et p la pression de l'atmosphère sur l'unité de surface. La pression de l'atmosphère sur la surface de la bulle est $p \times s$; par suite le travail accompli est $p \times s \times b$; mais le produit $s \times b$ n'est autre chose que le volume de l'espace cylindrique qui représente l'accroissement de volume de la masse gazeuse : si donc on représente par u cet accroissement, on peut représenter le travail extérieur par $p \times u$, c'est-à-dire qu'il est égal *au produit du nombre qui représente la pression de l'atmosphère sur l'unité de surface* (pression évaluée en kilogrammes), *par l'accroissement de volume du gaz* (volume évalué en mètres cubes).

On démontre, d'ailleurs, que cette expression convient également au cas où l'accroissement de volume du gaz se fai par le déplacement de diverses parties de la paroi, dans diverses direction

mouvements de ses molécules, accroissement acquis par le passage de la température primitive à une température plus élevée. Cet accroissement n'est pas mécaniquement mesurable, puisque les molécules sont inaccessibles à l'observation directe; mais la quantité de chaleur qui lui correspond s'évaluera facilement en calories, au moyen de la chaleur spécifique du gaz sous pression constante, c'est-à-dire du nombre de calories nécessaire pour élever de 1 degré la température de l'unité de poids du gaz, sous la pression atmosphérique : il suffira de la multiplier par le poids du gaz et par l'élévation de température dans l'expérience, pour connaître la quantité de chaleur dont il s'agit. — Cette quantité de chaleur, qui a pour effet d'élever la température du gaz, c'est-à-dire de lui donner la propriété d'exercer une action nouvelle sur les instruments thermométriques, est ce qu'on nomme l'accroissement de *chaleur sensible*.

On conçoit enfin, au moins théoriquement, que l'appareil puisse être disposé de manière à mesurer directement la quantité totale de chaleur fournie au gaz : il suffirait pour cela d'emprunter cette chaleur, par exemple, à un bain liquide dont on mesurerait l'abaissement de température. — Si l'on constate alors que la quantité totale de chaleur est égale à la somme des deux quantités qui correspondent, d'une part au travail extérieur, d'autre part à l'accroissement de chaleur sensible, on en devra conclure que ce sont là les deux seuls effets ayant une grandeur appréciable; que, par suite, il n'y a pas lieu d'attribuer de valeur appréciable à un *travail intérieur*, qui consisterait dans l'écartement que les molécules gazeuses ont subi, par rapport à leurs positions moyennes primitives; ou enfin que les actions exercées par les molécules gazeuses les unes sur les autres sont sensiblement nulles. C'est en effet la conclusion à laquelle ont conduit un certain nombre d'expériences, de M. Joule et d'autres physiciens, que nous ne pouvons développer ici.

Ajoutons enfin que l'expérience actuelle n'est pas réalisable avec une précision suffisante pour que l'on soit en droit d'en tirer une pareille conclusion : nous indiquerons un peu plus loin comment on arrive au même résultat par une méthode plus précise.

XI. **Effet de la chaleur sur un gaz assujetti à conserver un volume constant.** — Lorsqu'on fournit de la chaleur à un gaz dont le volume est assujetti à rester constant, on constate que, à mesure que sa température s'élève, sa force élastique augmente (200). Dans ces conditions, il n'y a aucun travail extérieur accompli, puisqu'il n'y a aucun déplacement des parois de l'enceinte. Il en résulte que toute la chaleur fournie au gaz a pour effet d'élever sa température, ou, en employant le langage de la théorie actuelle, d'accroître la force vive de ses molécules. — Quant à l'accroissement de force élastique qu'éprouve la masse gazeuse, c'est un effet qui ne correspond à aucune résistance vaincue, par suite à aucun travail effectué : on doit le considérer comme une manifestation de l'accroissement de force vive, manifestation qui est différente de

l'action exercée sur un corps thermométrique, mais qui peut servir, comme cette action elle-même, à évaluer le nouvel état thermique acquis par le gaz (*).

On comprend donc que, pour communiquer à une même masse gazeuse une même élévation de température, il doit falloir une moindre quantité de chaleur dans les conditions actuelles, où toute cette chaleur reste à l'état sensible, que dans les conditions où il y a à la fois apparition de chaleur sensible et production d'un travail extérieur. On voit même que la différence entre les quantités de chaleur nécessaires dans les deux cas, doit être précisément égale à la chaleur nécessaire pour effectuer le travail extérieur lui-même. — Cette conclusion, dont on pourrait concevoir la vérification par une expérience analogue à celle du paragraphe précédent, va se déduire simplement de la comparaison des résultats numériques obtenus depuis longtemps, sur les chaleurs spécifiques des gaz.

XII. **Comparaison de la chaleur spécifique d'un gaz à pression constante et de sa chaleur spécifique à volume constant.** — Le tableau de la page 299 fournit les chaleurs spécifiques *à pression constante* pour les gaz principaux : pour l'air en particulier, il donne le nombre 0,2374 ; des expériences plus précises ont donné 0,2377 ; c'est-à-dire que, pour échauffer de 1 degré 1 kilogramme d'air, sans changer sa pression, il faut lui fournir $0^{cal},257$. — Quant aux chaleurs spécifiques *à volume constant*, elles ont été déterminées dans une autre série de recherches ; la valeur relative à l'air est 0,1688 ; c'est-à-dire que, pour échauffer de 1 degré 1 kilogramme d'air, son volume restant constant, il faut lui fournir $0^{cal},1688$. — On remarquera d'abord que la seconde quantité est, comme nous l'avons fait prévoir, beaucoup plus petite que la première.

(*) Daniel Bernouilli a émis, sur la constitution des gaz, dès 1738, une hypothèse qu a été reprise par M. Joule et par un grand nombre d'autres physiciens; elle permet de se rendre compte de leurs diverses propriétés, et, entre autres, de celle dont il s'agit ici.— Les molécules gazeuses, n'exerçant les unes sur les autres aucune action sensible, seraient animées de mouvements rectilignes dans tous les sens, avec une vitesse constante pour chacune d'elles, et la valeur de cette vitesse dépendrait de la température elle-même. La pression qu'une masse gazeuse exerce, sur la paroi qui la contient, serait due à la succession des chocs de ses molécules, qui viendraient s'y heurter pour prendre ensuite un mouvement en sens contraire. — Dès lors, une addition de chaleur communiquée à une masse gazeuse, sous volume constant, en augmentant la vitesse des molécules, donnerait à la fois à ce gaz la propriété d'accuser une température plus élevée, ce qui est la manifestation ordinaire de l'accroissement de force vive intérieure, et la propriété d'exercer sur les parois de son enceinte une pression plus grande, résultant de ce que les molécules viendraient choquer la paroi avec une vitesse plus grande et à des intervalles plus fréquents.

Cette hypothèse de Bernouilli, qui s'introduit dans le calcul avec une extrême simplicité, rend compte de toutes les propriétés des gaz, loi de Mariotte, loi de Gay-Lussac, etc. Elle peut donc être considérée comme ayant une grande valeur, mais elle n'est nullement nécessaire à la théorie mécanique de la chaleur : cette théorie subsisterait tout entière, alors même que certains faits viendraient rendre inadmissible cette hypothèse particulière sur la constitution des gaz

Si maintenant on prend la différence de ces deux quantités de chaleur, savoir $0^{cal},0689$, et qu'on la multiplie par l'équivalent mécanique de la chaleur, on aura la valeur en kilogrammètres de la quantité de travail qu'elle représente. — Pour vérifier que le travail intérieur pendant la variation de volume est nul, il reste à comparer cette valeur à celle du travail extérieur produit par l'accroissement de volume du gaz, accroissement de volume qui est donné par l'étude expérimentale des dilatations. Le calcul, ainsi fait, conduit à un résultat aussi concordant qu'on pouvait l'espérer, eu égard à l'incertitude qui règne encore sur la valeur numérique *précise* de l'équivalent mécanique de la chaleur.

Mais il est un autre point de vue sous lequel on peut envisager la même question, et auquel il convient de s'arrêter plus particulièrement. — Des expériences directes et précises ont établi que, pour les gaz permanents comme l'air, le travail intérieur pendant les variations de volume est nul : on peut donc, en prenant maintenant cette propriété comme point de départ, et faisant encore usage des valeurs connues des chaleurs spécifiques, diriger le calcul de manière à en déduire une valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur : ce sera une nouvelle détermination numérique, évidemment toute différente de celles qui ont été précédemment indiquées. — C'est ce calcul très-simple que nous allons effectuer.

XIII. **Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur, par les propriétés connues des gaz.** — Un kilogramme d'air absorbe, pour s'échauffer de 1 degré sans changer de volume, $0^{cal},2377$. Un kilogramme d'air absorbe, pour s'échauffer de 1 degré en augmentant de volume de manière que sa pression ne varie pas, $0^{cal},1688$. Nous admettons maintenant, comme un fait d'expérience, que la différence $0^{cal},0689$ est une quantité de chaleur qui représente uniquement le *travail extérieur* accompli, par cette masse d'air, quand elle prend l'accroissement de volume qui correspond à une élévation de température de 1 degré, sans variation de pression.

Évaluons ce travail extérieur, en supposant que la température initiale de l'air soit zéro, et que la pression qu'il supporte soit la pression atmosphérique normale, égale à celle d'une colonne de 760 millimètres de mercure. — La pression p sur l'unité de surface, c'est-à-dire sur 1 mètre carré, est 10 333 kilogrammes. D'autre part, la densité de l'air par rapport à l'eau étant 0,001293, le volume occupé par 1 kilogramme d'air, dans les conditions initiales, volume évalué en mètres cubes, est $\frac{0,001}{0,001293}$, c'est-à-dire $0^{mc},7734$; l'accroissement de volume u, pour une élévation de température de 1 degré, s'obtiendra en multipliant ce nombre par le coefficient de dilatation 0,00367 ; donc le travail extérieur, égal au produit $p \times u$ (note de la page xii), est $10,333 \times 0,7734 \times 0,00367$, ou 29,3290. — En divisant la valeur de ce travail par la quantité de cha-

leur qui a été dépensée pour le produire, on obtient

$$\frac{29,3290}{0,0689} = 425,68;$$

telle est est la valeur numérique de l'équivalent mécanique de la chaleur, déterminée au moyen des propriétés de l'air (*).

XIV. **Effets de la chaleur sur les corps solides ou liquides. — Travail intérieur, accompagnant la variation de volume.** — Lorsqu'on fournit une certaine quantité de chaleur à un corps solide ou liquide, elle produit, comme dans un gaz, des effets de diverses natures; mais il est aisé de voir qu'elle se répartit, pour l'accomplissement de chacun d'eux, d'une manière toute différente.

Et d'abord, les coefficients de dilatation des solides et des liquides étant beaucoup plus petits que ceux des gaz, leurs variations de volumes, pour une même élévation de température, sont beaucoup moindres : par suite, le *travail extérieur* qui correspond au déplacement de la surface qui est pressée par l'atmosphère, est beaucoup plus petit. Si l'on considère, par exemple, un cube de fer de 1 décimètre de côté, ayant pour volume, en mètres cubes, 0,001, et si l'on élève sa température de 100°, le coefficient de dilatation cubique du fer étant environ 0,000036, l'accroissement de volume total u sera $0,001 \times 0,000036 \times 100$, c'est-à-dire 0,0000036 ; en multipliant cet accroissement de volume par la pression sur l'unité de surface 10 333 kilog., on trouve un produit égal à environ 0,04 de kilogrammètre. Dans les mêmes conditions un décimètre cube d'air, ayant un coefficient de dilatation à peu près 100 fois plus grand, effectuerait un travail extérieur 100 fois plus considérable. — Mais c'est surtout par comparaison avec le travail intérieur, que le travail extérieur actuel va apparaître comme une quantité très-petite et sensiblement négligeable.

Les molécules des corps solides ou liquides, bien loin d'être sans action sensible les unes sur les autres, doivent être, au contraire, considérées comme assujetties à des distances relatives déterminées, pour chaque température, par des forces dont la grandeur est accusée par les propriétés de ces corps. Ainsi, les expériences faites sur l'élasticité des corps solides

(*) Le même calcul, appliqué à d'autres gaz, conduit à des résultats numériques très-voisins, tant qu'il s'agit de gaz très-éloignés de leur point de liquéfaction, comme l'hydrogène, l'oxygène ou l'azote. On trouve des nombres beaucoup plus grands quand on l'applique à des gaz comme l'acide carbonique, le protoxyde d'azote, que la compression peut arriver à liquéfier. On doit en conclure que, dans ces derniers, le travail intérieur qui accompagne les changements de volume ne peut plus être regardé somme négligeable. — En d'autres termes, les actions moléculaires ne peuvent être considérées comme absolument nulles, que pour un corps qui présenterait l'*état gazeux parfait* : c'est une propriété qui n'appartient peut-être rigoureusement à aucun des gaz réels sur lesquels portent nos expériences, mais dont les gaz réels s'approchent d'autant plus qu'ils s'éloignent davantage de leur point de liquéfaction.

montrent que pour produire, sur le cube de fer pris pour exemple, sans lui fournir de chaleur, un accroissement de volume pareil à celui que produit ici la chaleur, il faudrait exercer sur lui, normalement à chacune de ses faces, une traction de plusieurs centaines de mille kilogrammes. Il est donc évident que la chaleur, en réalisant ce même effet, produit un *travail intérieur* dont la valeur est très-considérable par rapport au travail extérieur.

Enfin, la masse de fer dont il s'agit, étant devenue capable d'exercer, sur un instrument thermométrique une action différente de son action primitive, a éprouvé un accroissement de *chaleur sensible*.

Des phénomènes semblables, et de grandeur analogue, se produisent dans tous les corps solides ou liquides, tant qu'ils n'éprouvent aucun changement d'état. — Donc, en résumé, une addition de chaleur, faite à un corps solide ou liquide, produit réellement trois effets différents : 1° un travail extérieur; 2° un travail intérieur; 3° un accroissement de force vive intérieure. Mais contrairement à ce que nous avons vu pour les gaz, c'est ici le travail extérieur qui, dans les conditions ordinaires, est négligeable par rapport au travail intérieur. — Il en résulte que la quantité totale de chaleur qui est fournie à l'un de ces corps, dans des conditions données, doit être considérée comme se décomposant sensiblement en deux termes : l'un est l'équivalent calorifique du travail intérieur, correspondant au déplacement des molécules par rapport à leurs positions moyennes primitives; l'autre est l'équivalent calorifique de l'accroissement des forces vives intérieures, correspondant simplement à l'élévation de température. — L'évaluation numérique précise de l'un ou de l'autre de ces deux termes est impossible jusqu'ici; d'une part, à cause de l'incertitude de nos connaissances sur la constitution intime des corps; d'autre part, à cause des difficultés qui s'attachent à la détermination des chaleurs spécifiques des corps solides ou liquides sous volume constant (*).

(*) Rappelons ici quelques faits bien connus, qui montrent la grandeur des effets mécaniques que peuvent produire les corps solides ou liquides, lorsqu'ils éprouvent des variations de température dans des conditions où des obstacles résistants tendent à s'opposer à leurs variations de volume. — Des barres de fer scellées à leurs deux extrémités dans la pierre, peuvent occasionner, par leurs variations de température, des ruptures dans les édifices les plus solides. — Les feuilles de plomb ou de zinc qui sont employées pour les toitures arrachent les clous qui les fixent, lorsque le froid de l'hiver les fait contracter : on est obligé de les laisser libres par une partie de leur contour, en les superposant simplement par leurs bords comme des tuiles, pour permettre aux variations de dimensions de s'effectuer. — On s'explique de même le *jeu* qu'on laisse toujours entre les tuyaux successifs qui forment une conduite d'eau, surtout lorsqu'ils sont exposés à l'air; de même aussi, les intervalles qu'on est obligé de ménager entre les rails successifs d'une ligne de chemin de fer; si ces intervalles ne sont pas suffisants, les grandes chaleurs de l'été arrivent à produire des déformations de la voie, qui paraissent avoir été la cause déterminante de certains accidents. — On trouve enfin un exemple d'un travail extérieur, effectué sous l'influence d'un abaissement de température, dans une opération exécutée au Conservatoire des arts et métiers de Paris. Les deux murs d'une galerie ayant éprouvé un écartement anormal à leur partie supérieure, sous la charge de la

XV. **Passage de l'état solide à l'état liquide. — Chaleur de fusion.** — Lorsque les corps solides atteignent une certaine température, déterminée pour chacun d'eux, il arrive qu'une nouvelle addition de chaleur produit un changement d'état, c'est-à-dire que la masse passe, en totalité ou en partie, à l'état liquide : c'est le phénomène de la fusion. — Or, de ce que la température reste constante pendant que dure la fusion, on doit conclure qu'aucune partie de la chaleur fournie ne se communique au corps à l'état de *chaleur sensible*, et que, par suite, la somme de ses forces vives mo éculaires n'est pas modifiée. — Quant au travail extérieur, il serait rigoureusement nul si le corps était placé dans le vide : il est encore négligeable lorsque le corps est placé dans l'atmosphère, car un calcul simple montre que les petites variations de volume produites pendant la fusion correspondent à un travail extérieur très-petit, par rapport à celui qui serait l'équivalent mécanique de la quantité totale de chaleur fournie(*). On doit donc admettre que la chaleur fournie à un corps, pendant la fusion, correspond presque tout entière à l'accomplissement d'un travail intérieur, surmontant les actions moléculaires et amenant les molécules dans des positions moyennes différentes de celles qu'elles possédaient à l'état solide, sous la même température : à mesure que les diverses portions du corps reçoivent une quantité de chaleur capable d'effectuer ce travail pour les molécules qui les composent, celles-ci acquièrent les positions moyennes qui constituent l'état liquide; la liquéfaction devient complète lorsque la quantité de chaleur absorbée est telle que le même travail ait été effectué pour tous les points de la masse. — Cette chaleur absorbée a d'abord reçu le nom de *latente*, pour indiquer qu'elle n'est pas sensible au thermomètre : il est préférable de l'appeler *chaleur de fusion*.

XVI. **Passage de l'état liquide à l'état de vapeur. — Cha-**

voûte qu'elles supportent, on fit passer des barres de fer horizontales dans des ouvertures ménagées en face les unes des autres, au travers de l'un et de l'autre mur : ces barres ayant été chauffées, on adapta à leurs extrémités des écrous qui venaient s'appliquer fortement sur la paroi extérieure de chaque mur. Le refroidissement eut pour effet de rapprocher les deux murs l'un de l'autre, d'une quantité sensible ; l'opération répétée un certain nombre de fois finit par les rappeler à la verticalité.

Les liquides ont des coefficients de dilatations plus grands que celui des solides, d'où résulte qu'un liquide contenu dans un vase de verre tend à acquérir, quand on l'échauffe, un accroissement de volume plus grand que celui du vase (199); or on sait que, si un vase de terre a été entièrement rempli d'un liquide et hermétiquement bouché, il suffit d'une élévation de température de quelques degrés pour briser le vase, quelque résistant qu'il soit.

(*) Au moment de la fusion, la variation de volume est, d'ailleurs, tantôt un accroissement, comme cela a lieu pour la plupart des corps, tantôt une diminution, comme cela a lieu pour l'eau et pour quelques autres substances. Le travail extérieur, dû au déplacement de la surface qui supporte les pressions extérieures, est donc tantôt positif, tantôt négatif : il est toujours négligeable dans les circonstances ordinaires. Quand on lui donne des valeurs assez grandes, en augmentant la pression extérieure, les phénomènes deviennent plus complexes : il y a à la fois variation dans la quantité de chaleur nécessaire pour produire la fusion, et modification de la température de fusion, comme on l'a indiqué (281).

leur de vaporisation. — Un corps liquide auquel on fournit des quantités de chaleur graduellement croissantes, et dont la surface est soumise à une pression invariable, atteint en général une température à laquelle il entre en ébullition : à partir de ce moment, la température reste invariable, toute la chaleur fournie étant employée à convertir le liquide en vapeur. Examinons comment cette chaleur est utilisée, et prenons comme exemple l'ébullition de l'eau sous la pression atmosphérique.

Et d'abord, la température ne s'élevant pas, aucune partie de la chaleur communiquée ne reste à l'état de chaleur sensible, c'est-à-dire que la somme des forces vives moléculaires n'est pas modifiée.

Quant au *travail extérieur*, il n'est pas négligeable comme il l'était dans le cas de la fusion, puisque la vapeur acquiert un volume bien supérieur à celui du liquide. Il est d'ailleurs facile de l'évaluer approximativement. En effet, la connaissance de la densité de la vapeur d'eau permet de calculer le volume occupé par 1 kilogramme de vapeur à la température de 100° : on trouve à très-peu près 1 700 litres, c'est-à-dire que la vapeur acquiert un volume égal à 1 700 fois celui de l'eau qui l'a produite. Pour obtenir le travail extérieur effectué par 1 kilogramme d'eau au moment où elle se tran forme en vapeur, il suffit de multiplier la pression p sur l'unité de surface, savoir 10 333 kilogrammes, par l'accroissement de volume u exprimé en mètres cubes, savoir, $1^{mc},699$; on trouve ainsi 17 556 kilogrammètres. — Si l'on veut déterminer la quantité de chaleur que représente ce travail extérieur, il suffit de diviser ce nombre par l'équivalent mécanique 425, ce qui donne 41 calories : c'est là une quantité qui est loin d'être négligeable, car en la comparant à la quantité totale de chaleur absorbée par l'eau pendant la vaporisation, 537 calories, on voit qu'elle en est environ la treizième partie.

Enfin, le reste de la chaleur fournie pendant l'ébullition correspond à l'accomplissement d'un *travail intérieur*, surmontant les actions moléculaires qui s'exercent dant l'eau liquide, et amenant les molécules à des distances relatives telles, que les actions moléculaires acquièrent des valeurs à peu près insensibles.

En résumé, pour produire l'ébullition de l'eau sous la pression atmosphérique, l'expérience a montré qu'il faut fournir, par chaque kilogramme d'eau vaporisée, 537 calories : c'est ce que les physiciens avaient nommé la chaleur *latente* de vaporisation. Le treizième environ de cette quantité est employé à la production du travail extérieur, dû à la pression atmosphérique ; les douze treizièmes, à la production du travail intérieur qui amène le liquide à l'état de vapeur ; c'est à cette dernière partie qu'il convient de réserver le nom de *chaleur de vaporisation*.

XVII. **Notion de l'énergie. — Énergie actuelle, énergie potentielle, énergie totale.** — Nous venons de voir les variations des quantités de chaleur se manifester, dans les divers corps, soit par un travail extérieur, soit par des variations de force vive, soit enfin par une varia-

tion de chaleur sensible. Pour comprendre sous une même dénomination ces divers effets, M. Macquorn Rankine a proposé de les désigner sous le nom de variation d'*énergie*. Cette locution, introduite dans l'exposé des phénomènes mécaniques ou calorifiques, permet de les présenter d'une manière très-générale, en envisageant l'énergie sous deux points de vue différents, comme nous allons le montrer d'abord sur un exemple.

Soit un corps du poids de 4 kilogrammes, placé à une distance de 60 mètres au-dessus du sol. S'il vient à tomber de toute cette hauteur, il y a dépense d'une quantité de travail représentée en kilogrammètres par 4×60, ou 240 kilogrammètres : les conditions nouvelles dans lesquelles se trouve le corps peuvent se manifester soit par la force vive de translation dont il est animé au bas de sa chute, soit par la chaleur équivalente qui apparaîtrait s'il était arrêté brusquement, soit par la quantité de travail qu'il serait capable de produire. Nous avons montré que toutes ces manifestations sont équivalentes entre elles : c'est ce qu'on exprime en disant que le corps a reçu un accroissement d'*énergie actuelle*, mesuré par le nombre 240.

Supposons maintenant que le même corps, placé toujours à 60 mètres au-dessus du sol, tombe seulement de 40 mètres : le travail dépensé sera seulement de 4×40 ou de 160 kilogrammètres, et l'accroissement d'énergie actuelle sera seulement 160. Mais, ce même corps pouvant tomber encore de 20 mètres, son poids est encore capable de développer 4×20 ou 80 kilogrammètres : on peut donc considérer le corps, à l'instant dont il s'agit, comme possédant encore, au moins en puissance, une énergie mesurée par 80 : c'est ce qu'on nomme l'*énergie potentielle* ; elle deviendrait énergie actuelle, s'ajoutant à la première, si ce dernier mouvement se produisait en réalité. — On appelle accroissement d'*énergie totale* la somme 240 de l'accroissement d'énergie actuelle 160 et de l'énergie potentielle 80 ; elle représente, en valeur absolue, le travail qu'il aura fallu fournir au corps pour l'élever à la hauteur de 60 mètres.

En général, le travail fourni à un corps de poids P pour l'élever à une hauteur déterminée H doit être considéré comme lui ajoutant une énergie totale $P \times H$; tant que le corps reste à cette hauteur, elle reste tout entière à l'état d'énergie potentielle ; lorsqu'il tombe d'une hauteur h moindre que H, une partie apparaît à l'état d'énergie actuelle, elle a pour valeur $P \times h$, et l'autre partie $P(H - h)$ reste à l'état d'énergie potentielle ; enfin lorsque le corps est tombé de la hauteur totale H, toute l'énergie $P \times H$ qui lui avait été donnée apparaît à l'état d'énergie actuelle.

En appliquant à tous les phénomènes de mouvement les expressions dont nous venons de faire usage, on appelle *énergie actuelle* d'un corps ou d'un système de corps la force vive dont il est actuellement animé, soit dans un mouvement commun auquel participent tous ses points, soit dans les mouvements que ses points peuvent avoir les uns par rapport

aux autres; *énergie potentielle*, la force vive qui peut prendre naissance, s'il passe de son état actuel à un autre état déterminé, sous l'action des forces qui le sollicitent pendant le passage du premier état au second; *énergie totale*, la somme des deux quantités ainsi définies. — Prenons un exemple, emprunté aux phénomènes physiques déjà étudiés.

XVIII. **Application de la notion de l'énergie aux changements de volumes ou aux changements d'états produits par la chaleur. — Principe de la conservation de l'énergie.** — Soit un kilogramme de glace, à la température zéro, placé en présence d'un corps pouvant lui fournir de la chaleur, par exemple au sein d'une masse d'huile ayant une température plus élevée. L'étude physique du phénomène montre que la glace commence par se fondre, sans élévation de température; la fusion est complète lorsqu'elle a pris 79 calories à l'huile, dont la température s'abaisse. — La glace n'éprouvant pas de variation de température, toute la quantité de chaleur qu'elle reçoit est employée au travail intérieur, correspondant au déplacement de ses molécules par rapport à leurs positions moyennes primitives (XV) : la glace acquiert donc simplement un accroissement d'énergie potentielle, capable de reparaître à l'état de chaleur sensible si l'eau de fusion revenait à l'état solide. — Quant à l'huile, dont la température s'abaisse, il s'y produit à la fois une diminution des forces vives moléculaires, et un travail intérieur par le rapprochement des molécules (XIV); il y a donc à la fois diminution d'énergie actuelle et diminution d'énergie potentielle : la somme de ces deux quantités constitue la diminution d'énergie totale. — Lorsqu'on exprime, comme on le fait dans la méthode des mélanges, que la quantité de chaleur perdue par l'huile est exactement égale à la quantité de chaleur gagnée par l'eau, on ne fait autre chose qu'exprimer une égalité entre la perte d'énergie totale éprouvée par l'huile et le gain d'énergie potentielle éprouvé par l'eau, égalité qui est évidente s'il n'y a aucun autre effet concomitant. La valeur de la quantité d'énergie échangée entre les deux corps est d'ailleurs donnée par l'expérience : c'est l'équivalent mécanique de 79 calories, savoir 79×425.

Si, au moment où toute la glace est fondue, l'huile est encore à une température supérieure à zéro, la température de l'eau s'élève, en même temps que celle de l'huile s'abaisse; c'est-à-dire que la nouvelle diminution d'énergie totale de l'huile a pour effet un accroissement égal d'énergie totale pour l'eau. Lorsque l'eau arrive à 100 degrés, cet échange d'énergie entre les deux corps est représenté par l'équivalent mécanique de 100 calories, ou 100×425.

Enfin, si la masse d'huile possède encore une température supérieure à 100 degrés, il y a passage de l'eau à l'état de vapeur, sans élévation de température; c'est-à-dire que l'huile, en éprouvant une nouvelle diminution d'énergie totale, par la nouvelle quantité de chaleur qu'elle communique à l'eau, donne lieu simultanément à un travail extérieur, em-

ployé à vaincre la pression extérieure pendant la formation de la vapeur, et à un travail intérieur, employé à vaincre les actions moléculaires qui s'exerçaient dans l'eau : l'examen de ce phénomène nous a montré (XVI) que, si la transformation de l'eau en vapeur sous la pression atmosphérique est complète, il y a 537 calories absorbées, dont un treizième est employé au premier travail, et les douze treizièmes au second. La vapeur a reçu ainsi un accroissement d'énergie potentielle représenté par l'équivalent mécanique de ces 537 calories, ou 537×425.

Nous admettons donc toujours que, quels que soient les phénomènes qui se produisent dans le système formé par les deux corps, à la condition qu'il n'y ait aucun effet produit sur des corps étrangers, l'énergie totale de l'ensemble reste invariable. — C'est l'énoncé du principe général de la *conservation de l'énergie*, lequel n'est autre chose que le principe de la conservation de la force vive (VII) sous une forme à peine différente.

XIX. **Transformation de l'énergie sensible en énergie calorifique et transformation inverse. — Principe de Carnot.** — Nous avons appelé accroissement d'*énergie actuelle* d'un corps tout accroissement de force vive acquis par ce corps, quelle que soit d'ailleurs la nature du mouvement qui lui correspond : or, d'après tout ce qui précède, il peut se présenter sous deux formes assez différentes, qu'il importe de distinguer. — Si cet accroissement d'énergie correspond à l'un de ces mouvements dans lesquels les déplacements des divers points sont appréciables par les moyens ordinaires d'investigation, l'accroissement d'énergie actuelle prend, en particulier, le nom d'accroissement d'*énergie sensible*. — S'il correspond à un mouvement vibratoire imprimé aux divers points par rapport à leurs positions moyennes, ce mouvement n'étant appréciable qu'aux instruments thermométriques, l'accroissement d'énergie actuelle prend le nom d'accroissement d'*énergie calorifique*.

Nous avons vu déjà un grand nombre d'exemples de transformation de travail en chaleur, ou plus exactement d'énergie sensible en énergie calorifique [expériences de M. Joule (IV) et autres phénomènes analogues (III)]. La théorie montre que cette transformation est *toujours intégralement possible*, c'est-à-dire que, étant donnée une certaine quantité de travail ou d'énergie sensible, on peut toujours la transformer *tout entière* en chaleur ou en énergie calorifique, ajoutée à un corps déterminé, quel que soit l'état thermique initial de ce corps.

La réciproque de cette proposition serait complétement inexacte : dans aucun cas, la chaleur ou l'énergie calorifique, transmise d'un corps à un autre, ne peut être transformée *tout entière* en travail ou en énergie sensible. La démonstration de cette impossibilité a été donnée par M. Clausius et par M. William Thomson ; ils y ont été conduits par l'étude rationnelle des conditions dans lesquelles peuvent fonctionner les machines à feu, semblables à celles qu'emploie l'industrie.

La démonstration elle-même repose sur un principe qui a été admis

pour la première fois, en 1824, par Sadi Carnot, et qui peut être considéré comme une sorte d'axiome fondé sur l'observation : « Il est impossible de faire passer de la chaleur d'un corps plus froid sur un corps plus chaud sans dépense de travail. » — C'est le *principe de Carnot*, qui a servi de base à tous les développements donnés depuis à l'étude des machines où la chaleur est employée comme moteur.

Nous ne pouvons entrer ici dans le développement des nombreuses conséquences qui ont été déduites du principe de Carnot, et en particulier dans l'étude des machines thermiques, qui forme la partie la plus intéressante, au point de vue pratique, de la théorie mécanique de la chaleur. Ces développements ne peuvent être compris qu'à l'aide d'une analyse mathématique assez élevée : nous nous contenterons d'indiquer les résultats qu'ils ont fournis quant à l'emploi mécanique que peuvent faire les diverses machines de la chaleur dépensée pour les faire fonctionner.

XX. Coefficient économique des machines thermiques. — Dans les machines à feu, du genre de celles que l'industrie emploie, c'est, en général, par l'intermédiaire d'une vapeur ou d'un gaz que se fait la transformation d'une certaine quantité de chaleur en travail. Dans une machine à vapeur d'eau, par exemple, la chaudière et le condenseur étant supposés maintenus chacun à une température constante, l'eau qui se transforme en vapeur emprunte de la chaleur à la première source, que nous appellerons *la source chaude;* elle transmet une partie de son énergie au piston, sous forme de travail ou d'énergie sensible; elle en cède une autre partie au condenseur, que l'on peut envisager comme un corps de masse indéfini, maintenu à une température plus basse que la vapeur, et que nous appellerons *la source froide;* l'eau condensée, ramenée ainsi à la température de la source froide, revient ensuite à la chaudière, c'est-à-dire à la source chaude, pour y reprendre de la chaleur et continuer à parcourir, dans le même sens, la même série de transformations. — Or, si l'on réfléchit à cette condition que, dans le fonctionnement régulier de la machine, la source froide doit conserver une température constante, on voit que la chaleur qui lui est cédée par la condensation doit être considérée comme perdue, au point de vue utile. De là résulte que, même en supposant la machine installée avec une perfection idéale, elle ne peut utiliser, pour la production d'un travail, que la différence entre la quantité de chaleur communiquée par la source chaude et la quantité de chaleur abandonnée à la source froide.

Nous appellerons *coefficient économique théorique*, pour une machine fonctionnant dans des conditions déterminées, le rapport de l'énergie utilisable sous forme de travail, à l'énergie communiquée par la source chaude, en supposant qu'il n'y ait aucune perte étrangère de travail ou de force vive. — La théorie, qui permet de calculer rigoureusement ce nombre dans chaque cas particulier, montre qu'il est d'autant plus grand qu'il y

a une plus grande différence entre la température de la source chaude et la température de la source froide ; en d'autres termes, une machine, recevant une certaine quantité de chaleur à une température déterminée, peut en utiliser, sous forme de travail, une fraction d'autant plus grande qu'elle fonctionne entre des *limites de températures* plus éloignées.

En réalité, les conditions de perfection que nous avons supposées sont irréalisables : les pertes de chaleur éprouvées par la machine qui est placée dans l'atmosphère, les trépidations qui sont imprimées à ses divers organes, et transmises aux supports et au milieu environnant, sont, au point de vue utile, autant de causes de déperdition d'énergie, que l'on cherche à amoindrir, mais qu'il est impossible de supprimer. — Nous appellerons *coefficient économique pratique* le rapport de l'énergie pratiquement utilisée sous forme de travail utile, à l'énergie cédée par la source chaude : dans les machines bien construites, il est environ les trois quarts du coefficient théorique.

Les déterminations expérimentales, effectuées sur des machines bien installées, ont montré que le coefficient économique pratique n'est guère que $\frac{1}{20}$ dans les machines à vapeur d'eau fonctionnant à basse pression, c'est-à-dire à basse température. Il atteint la valeur $\frac{1}{8}$ ou $\frac{1}{7}$ dans les machines qui fonctionnent à 5 atmosphères, c'est-à-dire où la chaudière est maintenue à 152° et le condenseur à 40° environ. — Il peut atteindre et même dépasser la valeur $\frac{1}{2}$ dans les machines à air chaud et, en général, dans les machines à gaz, dont les limites de températures peuvent être beaucoup plus éloignées : cependant, l'usure rapide de ces machines, et les défauts de régularité qu'elles présentent dans leur action, les ont rendues jusqu'ici manifestement inférieures aux machines à vapeur, pour les besoins de la pratique.

XXI. **Chaleur dégagée ou absorbée dans les phénomènes chimiques.** — L'expérience montre que la plupart des combinaisons chimiques dégagent de la chaleur, au moment où elles se produisent : c'est à ce genre de phénomènes, et particulièrement aux phénomènes d'oxydation, que nous empruntons la plupart de nos sources de chaleur artificielle. La mesure des quantités de chaleur produites par l'oxydation d'un même poids des divers combustibles a été effectuée par des méthodes précises ; elle a montré que ces quantités sont extrêmement différentes d'un combustible à un autre, et elle a fourni au chimiste des valeurs numériques qui servent à caractériser le plus ou moins d'*affinité* de chacun d'eux pour l'oxygène. — La théorie mécanique de la chaleur permet de donner à ces quantités de chaleur mises en jeu une signification précise.

Soit, par exemple, 1 kilogramme d'hydrogène, en présence de la quantité d'oxygène nécessaire pour former de l'eau, c'est-à-dire 8 kilogrammes : supposons que la température des deux corps soit celle à laquelle la combinaison peut s'effectuer ; l'expérience montre que, au moment où cette combinaison s'effectue, le dégagement de chaleur est considérable :

si la combustion se produit en présence de corps pouvant absorber toute cette chaleur, de manière que le produit de la combustion revienne à une température sensiblement égale à la température primitive, on constate que ces corps acquièrent 34 462 calories. Or cette quantité de chaleur représente une quantité de travail égale en kilogrammètres à $34\,462 \times 425$, c'est-à-dire 14 646 350 ; la combinaison de 1 kilogramme d'hydrogène et de 8 kilogrammes d'oxygène produit donc, sur les corps extérieurs, un accroissement d'énergie actuelle dont ce nombre exprime la mesure. On doit donc admettre que l'oxygène et l'hydrogène, tant qu'ils étaient en présence sans se combiner, sollicités par les forces dues à leur affinité mutuelle, possédaient cette même énergie à l'état potentiel, ou enfin que le nombre précédent représente le travail qu'ont effectué ces mêmes forces au moment de la combinaison. — En général, la quantité de chaleur dégagée dans une combinaison fournit une mesure de l'énergie mise en jeu dans cette combinaison elle-même, ou du travail effectué par les *forces d'affinité*.

Maintenant on sait que, dans certains cas, une même combinaison, formée par les mêmes corps, peut se produire par plusieurs procédés différents : c'est ainsi, par exemple, que, en prenant du carbone libre et de l'oxygène libre, on peut former de l'acide carbonique, soit en n'allant d'abord que jusqu'à la production de l'oxyde de carbone et convertissant ensuite ce gaz en acide carbonique par l'addition d'une nouvelle quantité d'oxygène, soit en combinant du premier coup avec le carbone toute la quantité d'oxygène nécessaire pour la formation de l'acide carbonique lui-même. Or, au point de vue auquel nous nous sommes placés, il est évident que l'énergie potentielle correspondante à la transformation de 1 kilogramme de carbone en acide carbonique est une quantité déterminée ; dès lors la chaleur dégagée, qui n'est que la manifestation de cette énergie, doit toujours être la même, quelle que soit la voie suivie. L'expérience montre en effet, d'une part, que 1 kilogramme de carbone, en passant à l'état d'oxyde de carbone, dégage 2 473 calories, et que la quantité d'oxyde de carbone obtenue dégage, en passant à l'état d'acide carbonique, 5 607 calories; d'autre part, que 1 kilogramme de carbone, se combinant en une seule fois avec la quantité d'oxygène capable de former l'acide carbonique, dégage 8 080 calories, c'est-à-dire un nombre égal à la somme des deux précédents. Donc, dans les deux cas, l'énergie potentielle, que possédait le système des deux corps quand ils étaient séparés, s'est manifestée par l'apparition d'une même quantité d'énergie actuelle $8\,080 \times 425$, une fois la combinaison complétement effectuée : seulement, quand cette combinaison s'est produite en deux phases successives, une partie seulement de l'énergie potentielle a apparu à l'état d'énergie actuelle après la première phase, l'autre partie restant alors à l'état potentiel; après la seconde phase, cette seconde partie est enfin pparue à l'état actuel, comme la première.

On doit considérer comme évident, d'après tout ce qui précède, que pour effectuer la décomposition d'un composé chimique en ses éléments, il faut lui fournir précisément la quantité de chaleur que ces éléments auront dégagée en se combinant : ou que, en d'autres termes, pour mettre en liberté deux corps combinés, il faut emprunter à une source de chaleur une quantité d'énergie calorifique, c'est-à-dire d'énergie actuelle, précisément égale à la quantité d'énergie potentielle que doivent posséder les deux corps après leur séparation. — Cette proposition, pour laquelle les vérifications expérimentales sont à peine nécessaires, est conforme aux mesures déjà effectuées par les chimistes dans diverses circonstances (*).

XXII. **Phénomènes électriques et magnétiques. — Application du principe de la conservation de l'énergie.** — Si la nature intime des phénomènes électriques et magnétiques paraît difficile à définir, dans l'état actuel de la science, il est facile, au contraire, d'apercevoir, entre les causes qui leur donnent naissance et les effets qu'ils produisent, les relations générales que nous avons signalées dans les phénomènes de la chaleur et du mouvement. Cette généralisation a déjà été mise hors de doute par des recherches précises, dues aux savants modernes : nous nous contenterons d'indiquer, d'une manière très-succincte, les considérations les plus générales auxquelles l'examen de ces phénomènes peut donner lieu.

Le frottement, qui a été le premier moyen connu pour produire l'électricité, est une dépense d'énergie : le principe général de la *conservation de l'énergie* nous conduit à considérer cette énergie dépensée comme devant se retrouver intégralement dans les corps auxquels le frottement a été appliqué. Or, deux corps qu'on a frottés l'un contre l'autre, et qu'on sépare ensuite, présentent, indépendamment de leur élévation de température, ces propriétés spéciales dont nous avons étudié les manifestations, et qu'on exprime en disant qu'ils sont *électrisés*. Nous avons vu qu'ils peuvent se mettre en mouvement l'un vers l'autre, c'est-à-dire accomplir un travail, et que, si la distance qui les sépare devient suffisamment petite, il se produit entre eux des étincelles, c'est-à-dire un développement de chaleur sensible, et un travail extérieur dû au refoulement de l'air ou du milieu qui les sépare. Ces divers effets correspondent manifestement cha-

(*) Certains composés chimiques, tels que les combinaisons oxygénées de l'azote, e chlorure d'azote et quelques autres, absorbent au contraire de la chaleur au moment où ils se produisent, et dégagent de la chaleur en se détruisant. Ces composés ont reçu le nom général de *corps explosifs*, parce que la chaleur mise en liberté au moment de leur décomposition peut donner à leurs éléments, qui sont le plus souvent à l'état gazeux, une force expansive capable de produire une explosion véritable. — Pour ces corps, en assez petit nombre jusqu'ici, c'est dans la combinaison toute formée qu'on doit admettre une énergie potentielle, se traduisant par l'apparition d'énergie calorifique, c'est-à-dire d'énergie actuelle, au moment où cette combinaison se détruit. — Il est, d'ailleurs, digne de remarque que ces combinaisons ne peuvent être produites directement, en mettant en présence leurs éléments séparés.

cun à une certaine quantité d'énergie, qui apparaît alors à l'état actuel, et qu'on doit considérer comme étant restée à l'état potentiel tant que les deux corps, éloignés l'un de l'autre, conservaient leur état électrique.

Si l'on tient compte, en outre, de l'échauffement éprouvé par les corps frottés, on voit que, lorsqu'on électrise deux corps par le frottement et qu'on les sépare ensuite, on accomplit la transformation de l'énergie dépensée par le frottement lui-même, en deux termes qui expriment : 1° l'accroissement d'énergie qui correspond à la modification de leur état thermique; 2° l'accroissement d'énergie potentielle qui correspond au nouvel état électrique. La somme de ces deux termes doit être égale à l'énergie dépensée : la vérification est évidemment accessible à l'expérience, puisqu'on peut obtenir une évaluation du second terme, par la mesure des effets divers qu'il produit en passant à l'état d'énergie actuelle.

L'action chimique, qui produit le développement d'électricité dans une pile, est encore, comme nous l'avons vu, une dépense d'énergie correspondante au travail effectué par les affinités mises en jeu (XXI). Si les pôles de la pile sont isolés, la tension qu'on y observe est, comme dans les corps électrisés par le frottement, la manifestation d'un accroissement d'énergie potentielle, égal à la quantité limitée d'énergie qui a été dépensée dans la réaction chimique.— Si les pôles sont réunis par un corps conducteur et indécomposable, comme un fil métallique, le phénomène électrique devient continu et prend le nom de *courant;* il se produit un dégagement continu de chaleur, à la fois dans ce fil et dans la pile elle-même ; s'il n'y a aucun autre effet concomitant, l'expérience montre que la quantité totale de chaleur dégagée dans tout le circuit, en un temps donné, est rigoureusement égale à celle qui correspond à la quantité d'action chimique accomplie pendant ce même temps. — Si enfin le circuit contient un corps composé, ou ce que nous avons appelé un *électrolyte,* la décomposition qu'il éprouve correspond à la consommation d'une certaine quan ité d'énergie, qui passe à l'état potentiel dans les corps mis en liberté; par suite, la chaleur dégagée dans le circuit, pour une même quantité d'énergie dépensée dans la pile, doit diminuer d'autant ; c'est alors la somme de l'énergie correspondante à la décomposition effectuée et de l'énergie correspondante à la chaleur dégagée dans le circuit, qui doit être égale à l'énergie dépensée dans la pile. Ce résultat est pleinement confirmé par les expériences les plus précises (*).

(*) Ces considérations donnent, par exemple, l'explication du fait suivant : L'expérience montre qu'*un seul* élément de pile, formé de zinc et de cuivre, quelque grandes que soient ses dimensions, est incapable de décomposer l'eau dans un voltamètre; *deux* éléments de pile, quelque petites que soient leurs dimensions, suffisent pour effectuer une décomposition. — Voici l'explication. Dans un circuit formé d'une pile et d'un voltamètre à eau, on sait, d'après la loi de Faraday (528), qu'à un équivalent d'hydrogène dégagé dans le voltamètre correspond un équivalent de zinc consommé dans chacun des éléments de pile; de sorte que, pour dégager 1 gramme

Les diverses parties d'un conducteur parcouru par un courant électrique exercent les unes sur les autres des actions attractives ou répulsives, qui peuvent produire les divers mouvements dont l'étude constitue l'Électrodynamique. Si, dans un circuit déterminé, des mouvements de ce genre se produisent entre des parties mobiles, ils constituent une dépense d'énergie sensible, laquelle doit être empruntée encore à l'énergie fournie par la pile. — Il en résulte que si, dans un même circuit, se produisent à la fois des décompositions électrolytiques et des mouvements électrodynamiques, l'énergie mise en jeu dans la pile par les affinités chimiques doit être égale à la somme de trois termes, qui correspondent . 1° à la chaleur dégagée dans le circuit, 2° à l'énergie acquise par les produits de la décomposition, 3° au travail absorbé par les mouvements des conducteurs. Si une cause quelconque vient à accroître la valeur de l'un de ces trois termes, la pile conservant la même activité, la somme des deux autres termes doit éprouver une diminution correspondante. C'est ce que vérifient de nombreuses expériences, et en particulier les expériences effectuées par M. Favre, dans des conditions très-diverses.

Dans la production des courants thermo-électriques, nous trouvons une dépense d'énergie calorifique, donnant naissance à des courants capables de produire des effets semblables à ceux qui précèdent.

Dans la production des courants d'induction, un mouvement imprimé à un circuit fermé, au voisinage d'un autre circuit parcouru par un courant, a pour effet l'apparition d'un courant dont les effets sont encore tout à fait semblables ; en d'autres termes, une dépense d'énergie sensible correspond à la production de phénomènes électriques mettant en jeu, sous des formes diverses, une égale quantité d'énergie.

En résumé, l'électricité apparaît comme un intermédiaire capable de transformer, par un mécanisme encore inconnu, une quantité déterminée d'énergie, dépensée sous une forme quelconque, en un certain nombre de quantités d'énergie, capables de se manifester sous toutes les formes diverses que l'énergie peut prendre; la valeur relative de ces quantités est déterminée dans chaque cas par des conditions spéciales, mais leur somme doit toujours être égale à la quantité dépensée.

d'hydrogène, il faut consommer 33 grammes de zinc dans chaque élément. — Or, on a trouvé que la mise en liberté de 1 gramme d'hydrogène exige environ 31 calories la consommation de 33 grammes de zinc en dégage seulement 16; il est donc impossible qu'un seul élément de pile effectue la décomposition de l'eau. — Si l'on emploie deux éléments, cet effet pourra se produire : à chaque gramme d'hydrogène dégagé dans le voltamètre et absorbant 31 calories, correspondra la consommation de 2 fois 33 grammes de zinc, produisant 32 calories : une calorie apparaîtra dans le circuit sous forme de chaleur. — A plus forte raison, un plus grand nombre d'éléments pourront-ils produire le même effet électrolytique, et alors la chaleur dégagée dans le circuit augmentera avec le nombre des éléments.

Les analogies intimes qui existent entre les phénomènes de l'électricité et ceux du magnétisme permettent d'étendre à ceux-ci toutes les considérations précédentes. — Un seul exemple, celui de la machine de Clarke nous suffira pour montrer comment le magnétisme peut servir d'intermédiaire pour transformer une quantité de travail en une quantité de chaleur, ou en une quantité d'énergie, sous l'une quelconque de ses formes. Quand la machine de Clarke fonctionne, l'énergie dépensée est celle qui correspond au travail nécessaire pour mettre en mouvement les noyaux de fer doux et les bobines qui les entourent : ces noyaux, en passant successivement devant les deux pôles de l'aimant fixe, acquièrent une aimantation alternativement dans un sens et dans l'autre, et donnent ainsi naissance aux courants d'induction dans le fil des bobines ; l'énergie mise en liberté est alors, soit une énergie calorifique, comme quand on emploie l'appareil à faire rougir un fil, soit l'énergie potentielle communiquée aux éléments d'un électrolyte dont on opère la décomposition, etc. — C'est sur des transformations de ce genre qu'est fondé l'emploi d'un grand nombre de machines, construites depuis un certain nombre d'années, et qui ne sont que des modifications de la précédente.

XXIII. **Origine de la chaleur et du mouvement chez les animaux.** — On sait, depuis Lavoisier, que la respiration des animaux consiste essentiellement dans des réactions chimiques qui s'adressent à leurs divers éléments organiques, et les font passer à un état d'oxydation plus élevée. Parmi les corps ainsi produits, on doit citer particulièrement l'eau et l'acide carbonique : ils proviennent de l'hydrogène et du carbone qui étaient contenus, soit dans les aliments, soit dans les tissus de l'animal : dans l'un et l'autre cas, ils n'étaient primitivement combinés qu'avec une quantité d'oxygène insuffisante pour former de l'acide carbonique et de l'eau. C'est donc à une véritable combustion, donnant naissance à ces deux produits et à quelques autres, que l'on doit attribuer la production de la chaleur animale.

Or, quand l'animal est à l'état de repos, toute l'énergie correspondante au travail des affinités apparaît sous la forme d'énergie calorifique : la chaleur qui prend naissance a uniquement pour effet de compenser les pertes que l'animal éprouve par le rayonnement, par le contact de l'air ou par l'évaporation. — Si, au contraire, l'animal exécute des mouvements, s'il produit un travail, alors une partie de l'énergie correspondante au travail des affinités doit être employée à l'accomplissement de ce travail, absolument comme, dans une machine à vapeur, une partie de la chaleur développée par le combustible est convertie en travail utile.

Ces idées, émises dès 1845 par M. Jules-Robert Mayer, de Heilbronn, furent d'abord considérées comme une conception qui présentait un haut degré de probabilité, mais qui devait être difficilement accessible au contrôle de l'expérience, à cause de la nature complexe des phénomènes physiologiques : elles reçurent, en 1858, une remarquable confirmation par

des expériences dues à M. Hirn, de Colmar. — Dans ces expériences. M. Hirn prit pour mesure de l'énergie mise en jeu dans la combustion respiratoire, chez l'homme, la quantité d'oxygène consommée; il plaçait dans une petite chambre, disposée de manière à permettre le renouvellement de l'air et le dosage des gaz contenus dans l'air sortant, un homme qui devait exécuter successivement les deux prescriptions suivantes : 1° garder pendant un certain temps un repos absolu; 2° exécuter pendant un certain temps un mouvement d'ascension, sur des palettes disposées à la circonférence d'une roue, qui se dérobait d'elle-même à mesure qu'il la gravissait. En déterminant, dans chacun de ces deux cas, la quantité de chaleur émise et la quantité d'oxygène consommée, on en déduisait la quantité de chaleur dégagée pour 1 gramme d'oxygène disparu. — On trouva ainsi que la chaleur dégagée, pour un gramme d'oxygène absorbé, est toujours moindre pendant le mouvement d'ascension que pendant le repos, c'est-à-dire que, à *une même dépense* d'énergie respiratoire, correspond l'apparition d'une énergie calorifique moindre pendant le mouvement que pendant le repos; la différence représente évidemment l'énergie sensible qui correspond au travail effectué (*).

C'est donc l'exercice des affinités chimiques, c'est-à-dire l'énergie rendue disponible par la combustion respiratoire, qui est en définitive la cause de nos mouvements. L'animal, doué de mouvement volontaire, ne crée pas plus la force nécessaire à l'accomplissement de ses divers actes, qu'une machine thermique ne crée la force qui met en mouvement ses organes et les rend capables d'effectuer un travail. « L'intervention de la volonté, comme on l'a dit bien des fois après M. Mayer, est seulement assimilable à celle du pilote ou du machiniste qui, dans un navire à vapeur, ne fait que distribuer à la machine, d'une manière intelligente, l'énergie mise en liberté par la combustion du charbon dans la chaudière : sans cette énergie, quelque parfaite que soit la machine, quelque puissante que soit la volonté de ceux qui doivent la conduire, le navire resterait inerte et frappé de mort. »

XXIV. **Coefficient économique de la machine humaine.** — D'après ce que nous venons de voir, la machine humaine peut être assimilée à une machine thermique et l'on peut calculer son *coefficient économique pratique*, c'est-à-dire le rapport de l'énergie utilisée dans le

(*) Il est essentiel de remarquer que ces résultats de la théorie, confirmés par l'expérience, ne sont pas en contradiction avec ce fait, d'observation journalière, que l'exercice corporel donne lieu à une élévation de température du corps au-dessus de la température pendant le repos. La mesure des gaz absorbés et dégagés montre, en effet, que les mouvements musculaires activent considérablement la combustion respiratoire; c'est là, d'ailleurs, ce qui provoque la nécessité d'une alimentation plus abondante après un exercice violent. Dès lors, l'énergie respiratoire mise en jeu dans le même temps étant beaucoup plus considérable, on conçoit que la température du corps puisse s'élever, bien qu'une partie de cette énergie soit employée au travail extérieur, si l'autre partie, restant à l'état d'énergie calorifique, est supérieure à la valeur qu'elle a pendant le repos. — C'est en effet ce que montrent les expériences de mesure

travail qu'elle effectue, à l'énergie développée par les combustions qui s'y produisent. Voici le résultat de ce calcul, à peu près tel qu'il a été présenté par M. Helmholtz.

Un homme adulte, en gravissant une montagne qui ne présente pas trop d'obstacles, peut élever son propre poids, en une heure, d'une hauteur verticale égale à 540 mètres environ ; l'activité respiratoire, pendant cet exercice, correspond à un travail à peu près égal au produit de ce poids par 5 fois 540 mètres ; il en résulte que, dans les circonstances dont il s'agit, le coefficient économique présente une valeur égale à $\frac{1}{5}$ environ. — La machine humaine apparaît ainsi comme présentant une perfection remarquable, comparativement aux machines thermiques que nous savons construire (XX), surtout si l'on réfléchit aux faibles différences de température que présentent ses divers points, c'est-à-dire aux limites étroites entre lesquelles elle est assujettie à fonctionner.

XXV. **Absorption de la chaleur solaire par le développement des végétaux.** — Dans les végétaux, le résultat définitif de la vie est, pour ainsi dire, inverse de celui de la vie animale ; le végétal peut être considéré comme empruntant, au milieu qui l'environne, l'eau et l'acide carbonique, pour les convertir en des composés dont l'oxygène est éliminé, presque en totalité, et qui sont formés principalement d'hydrogène et de carbone ; les substances végétales sont, comme on l'a dit quelquefois, des matières *débrûlées*. Ce résultat final, qui constitue le phénomène essentiel du développement des tissus végétaux, est contraire aux affinités chimiques ; il exige que le végétal emprunte, à une source extérieure, toute la quantité de chaleur qui est équivalente au travail accompli par les éléments qui se séparent, malgré les forces d'affinité qui les sollicitent. — Cette source de chaleur n'est autre que le soleil, dont l'action est indispensable au développement des végétaux, au moins des végétaux supérieurs ; la force vive du mouvement ondulatoire qui constitue les radiations solaires, arrivant à la plante sous forme d'énergie calorifique, est employée par elle à effectuer la séparation des éléments de l'acide carbonique et de l'eau. Cependant, ici encore, il n'y a pas déperdition d'énergie, mais simplement transformation : les éléments hydrocarbonés de la plante, séparés de l'oxygène auquel ils étaient primitivement unis, ont acquis un accroissement d'énergie potentielle, qui reparaîtra à l'état d'énergie actuelle le jour où ces éléments se combineront de nouveau avec l'oxygène, c'est-à-dire le jour où ils éprouveront une combustion les ramenant à l'état d'eau et d'acide carbonique.

XXVI. **La chaleur solaire est la source de tout mouvement à la surface du globe.** — D'après l'ensemble de toutes ces considérations, dont M. Mayer a fait le premier ressortir toute la valeur, la chaleur solaire apparaît comme la source de toute énergie à la surface de la terre ; en sorte que tous les mouvements effectués, soit par les êtres animés,

soit par les corps inanimés qui nous entourent, ne sont que des manifestations de la force vive des radiations solaires.

L'animal emprunte, à la combustion des matériaux qui lui sont fournis par l'alimentation, l'énergie nécessaire à l'accomplissement de ses mouvements. Or un grand nombre d'animaux sont exclusivement herbivores : ceux qui sont carnivores se nourrissent d'animaux qui ont emprunté eux-mêmes au règne végétal les éléments de leurs tissus; on peut donc dire que toutes les substances qui doivent être employées comme combustibles dans la respiration des animaux, et fournir l'énergie nécessaire à leurs mouvements, sont empruntées aux végétaux. D'autre part, les végétaux empruntent à la chaleur solaire l'énergie nécessaire à la formation de ces substances combustibles elles-mêmes. C'est donc, en réalité, dans la chaleur solaire qu'on doit voir l'origine des mouvements effectués par les animaux : les végétaux constituent des intermédiaires qui gardent en réserve, pour ainsi dire, l'énergie fournie par le soleil, et la fournissent à leur tour aux animaux qu'ils alimentent.

Quant aux mouvements effectués par nos machines, ils empruntent également à la même origine toute l'énergie qui y est mise en jeu. Pour les machines alimentées par la combustion du bois, la chose est évidente. Celles qui sont alimentées par la combustion de la houille ne font qu'emprunter, au combustible enfoui dans le sol, l'énergie que la chaleur solaire avait accumulée dans les végétaux des siècles passés. Il en est évidemment de même encore des machines dans lesquelles le combustible employé est le coke, le gaz d'éclairage, les diverses huiles hydrocarbonées, etc.

C'est la chaleur solaire qui transforme en vapeur les eaux des mers ou des fleuves, et contribue à la formation des nuages; c'est l'énergie accumulée dans ces masses d'eau, suspendues au sein de notre atmosphère, qui reparaît à l'état d'énergie sensible quand elles retombent sous la forme de pluies ou de neiges, et viennent former les cours d'eau dont la force vive se transmet aux machines hydrauliques.

C'est la chaleur solaire qui produit à la surface du globe ces mouvements de l'atmosphère qui constituent les vents, et qui peuvent parfois communiquer à l'air une vitesse assez grande pour occasionner les plus grands désastres. Enfin, quand l'homme utilise une partie de cette force vive de translation, pour gonfler les voiles des navires ou pour faire tourner les ailes des moulins, il ne fait encore qu'employer, pour un travail utile, une énergie dont l'origine est tout entière dans la chaleur émise par le soleil

TRAITÉ

DE

PHYSIQUE ÉLÉMENTAIRE

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

NOTIONS DE MÉCANIQUE

1. **Du mouvement en général.** — Un point matériel est dit *en mouvement*, lorsqu'il occupe dans l'espace des positions successives, variables avec le temps.

Le mouvement d'un point est complétement défini, si l'on connaît : 1° sa *trajectoire*, c'est-à-dire la ligne qui contient les positions successives de ce point ; 2° une relation entre les valeurs du temps, comptées à partir d'un instant déterminé, et les espaces parcourus sur la trajectoire, comptés à partir d'un point pris sur la trajectoire elle-même; une pareille relation est dite une *équation du mouvement*.

2. **Mouvement uniforme.** — Un mouvement est dit *uniforme*, lorsque les espaces parcourus dans des intervalles de temps égaux sont égaux, quels que soient ces temps.

On appelle *vitesse* d'un mouvement uniforme l'espace parcouru dans un intervalle de temps égal à l'unité. — L'unité de temps adoptée ordinairement est la seconde sexagésimale.

La vitesse est donc exprimée en unités de longueur, comme les espaces : en mètres, par exemple, si le mètre a été pris pour unité de longueur.

La définition même du mouvement uniforme donne immédiatement la forme de l'équation de ce mouvement : soit v le nombre constant qui

exprime la vitesse, et convenons de compter les espaces à partir du point même où se trouve le mobile à l'instant pris pour origine du temps; au bout d'un nombre quelconque de secondes t, l'espace parcouru sera

$$e = vt.$$

Étant donné un point animé d'un pareil mouvement, il suffira, pour déterminer la valeur de la constante v, de mesurer l'espace parcouru pendant un certain nombre de secondes, et de diviser cet espace par ce nombre de secondes. Si, par exemple, un point parcourt, d'un mouvement uniforme, 24 mètres en 8 secondes, sa vitesse est de $\frac{24}{8}$ ou de 3 mètres par seconde.

3. **Mouvement varié. — Vitesse moyenne entre deux instants déterminés. — Vitesse à un instant déterminé.** — Un mouvement est dit *varié*, lorsque les espaces parcourus dans des intervalles de temps égaux ne sont pas égaux.

Représentons par AB (*fig.* 1) la trajectoire d'un mobile situé en A à l'instant pris pour origine du temps, et animé d'un mouvement varié. Soit AM l'espace parcouru au bout d'un certain temps t; désignons-le par e. Soit Am l'espace parcouru au bout du temps $t+\theta$; désignons-le par $e+\varepsilon$. L'espace Mm ou ε est l'espace parcouru pendant l'intervalle de

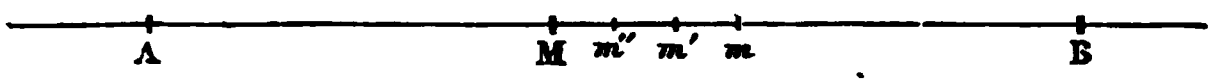


Fig. 1.

temps θ. Or on conçoit que le mobile aurait pu parcourir ce même espace d'un mouvement uniforme, dans le même intervalle de temps, à la condition d'avoir une vitesse convenable, qui serait $\frac{\varepsilon}{\theta}$. Cette vitesse est ce qu'on nomme la *vitesse moyenne* du mobile entre les deux instants t et $t+\theta$: elle s'obtient, comme on voit, en divisant l'accroissement ε de l'espace parcouru, par l'accroissement θ du temps.

Considérons maintenant, au lieu de l'accroissement θ donné au temps t, un accroissement plus petit θ'; l'espace parcouru AM sera accru seulement de Mm' ou ε', et la vitesse moyenne, entre le temps t et le temps $t+\theta'$, sera $\frac{\varepsilon'}{\theta'}$. De même, pour un accroissement de temps θ'', l'accroissement d'espace étant Mm'' ou ε'', la vitesse moyenne entre le temps t et le temps $t+\theta''$ sera $\frac{\varepsilon''}{\theta''}$, et ainsi de suite. Or, si l'on fait décroître indéfiniment les intervalles θ, θ', θ'',... les quotients $\frac{\varepsilon}{\theta}, \frac{\varepsilon'}{\theta'}, \frac{\varepsilon''}{\theta''}, \ldots$ tendent en général vers une limite déterminée : cette limite est ce qu'on nomme la

vitesse à l'instant t. — On appelle donc *vitesse à un instant déterminé* la limite vers laquelle tend le rapport de l'accroissement de l'espace à l'accroissement du temps, lorsque ce dernier converge vers zéro.

4. **Mouvement uniformément varié.** — Un mouvement est dit *uniformément varié*, lorsque la vitesse varie de quantités égales en des temps égaux, quels que soient ces temps. — Il est *uniformément accéléré* ou *uniformément retardé*, selon que ces variations augmentent la vitesse ou la diminuent.

On appelle *accélération*, dans un pareil mouvement, la variation de la vitesse dans l'unité de temps. Elle est exprimée en unité de longueur, comme la vitesse. On voit, en outre, qu'elle est de même signe que la vitesse ou de signe contraire, selon que le mouvement est uniformément accéléré ou uniformément retardé. — Nous allons examiner successivement chacune de ces deux espèces de mouvements.

5. **Mouvement uniformément accéléré.** — Considérons un mobile animé d'un mouvement uniformément accéléré, depuis l'instant pris pour origine du temps. Soit v_0 sa vitesse initiale, et γ l'accélération ; si l'on désigne par v la vitesse au bout du temps t, on a, d'après la définition même de l'accélération,

$$(1) \qquad v = v_0 + \gamma t.$$

Cette équation, qui exprime une relation entre les valeurs numériques du temps et les valeurs correspondantes de la vitesse, doit être considérée comme une équation du mouvement : elle suffit pour le définir, quand on connait la trajectoire. — Il est facile d'ailleurs, comme nous allons le montrer, de la transformer en une relation explicite entre les valeurs du temps et les valeurs correspondantes de l'espace parcouru.

Partageons le temps t en intervalles égaux θ, assez petits pour que la vitesse puisse être considérée comme restant sensiblement constante pendant la durée de chacun, et comme variant seulement aux instants qui séparent chaque intervalle de l'intervalle suivant. Soit n le nombre de ces intervalles, en sorte qu'on ait $t = n\theta$. On pourra calculer les chemins a_1, a_2, a_3 .... a_n parcourus pendant chacun de ces intervalles de temps successifs, au moyen de la formule du mouvement uniforme, à la condition de donner à la vitesse, entre chaque intervalle de temps et le suivant, l'accroissement constant $\gamma\theta$. On trouve ainsi :

$$\begin{aligned}
a_1 &= v_0\,\theta.\\
a_2 &= (v_0 + \gamma\theta)\,\theta.\\
a_3 &= (v_0 + 2\gamma\theta)\,\theta.\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\\
a_n &= [v_0 + (n-1)\gamma\theta]\,\theta.
\end{aligned}$$

Or la somme $a_1 + a_2 + a_3 + \ldots + a_n$ n'est autre chose que l'espace par-

couru pendant le temps $n\theta$, espace compté à partir du point où se trouvait le mobile à l'instant zéro. On a donc

$$e = nv_0\theta + \gamma\theta^2[1+2+3+\ldots.(n-1)],$$

ou, en effectuant la somme des termes de la progression arithmétique qui est dans le second membre,

$$e = nv_0\theta + \gamma\theta^2\frac{n(n-1)}{2},$$

ce qu'on peut écrire

$$e = v_0 n\theta + \frac{\gamma}{2}.n\theta(n\theta-\theta);$$

ou enfin, en remplaçant maintenant $n\theta$ par t,

$$e = v_0 t + \frac{\gamma}{2}t(t-\theta).$$

Or cette formule donne la valeur de l'espace parcouru e avec d'autant plus d'exactitude que θ est plus petit : et, à la limite, si l'on fait θ égal à zéro, il vient

$$(2) \qquad e = v_0 t + \frac{\gamma t^2}{2}.$$

Remarque. — Si l'on considère le cas particulier où la vitesse initiale est nulle, on a $v_0 = 0$; alors la formule (1) devient

$$v = \gamma t$$

c'est-à-dire que *les vitesses sont proportionnelles aux temps.*

La formule (2) devient, dans la même hypothèse,

$$e = \frac{\gamma t^2}{2}$$

c'est-à-dire que *les espaces sont proportionnels aux carrés des temps.*

Enfin, si l'on élimine le temps entre les deux équations que l'on vient d'obtenir, on a

$$v = \sqrt{2\gamma e}$$

c'est-à-dire que *les vitesses sont proportionnelles aux racines carrées des espaces parcourus.*

L'une quelconque de ces trois lois suffit pour caractériser le mouvement : les trois formules qui les expriment sont équivalentes entre elles, et il suffit de connaître la valeur numérique de la constante γ qu'elles contiennent, pour que le mouvement soit complétement déterminé.

6. **Mouvement uniformément retardé.** — Considérons un mobile animé d'un mouvement uniformément retardé, depuis l'instant pris pour origine du temps. Si l'on désigne par v_0 sa vitesse initiale et par γ la

diminution de la vitesse dans l'unité de temps, la définition même de la quantité γ donne pour valeur de la vitesse, à un instant déterminé t,

$$v = v_0 - \gamma t.$$

De cette formule, on déduira comme précédemment la valeur de l'espace parcouru e, compté positivement dans le sens de la vitesse initiale v_0,

$$e = v_0 t - \frac{\gamma t^2}{2}.$$

Ces diverses formules trouveront leurs applications plus loin, principalement dans l'étude des mouvements des corps sous l'action de la pesanteur.

7. **Principe de l'inertie.** — *Un corps matériel ne peut modifier de lui-même, ni son état de repos, ni son état de mouvement.*—Par cet énoncé général, on doit entendre :

1° Qu'un point matériel en repos, si aucune cause extérieure n'agit sur lui, demeure en repos : c'est ce qu'on peut appeler l'*inertie dans le repos ;*

2° Qu'un point matériel en mouvement, si aucune cause extérieure n'agit sur lui, conserve indéfiniment un mouvement rectiligne et uniforme : c'est ce qu'on peut appeler l'*inertie dans le mouvement*.

Le principe de l'inertie doit être considéré comme un résultat d'observation : il sera vérifié par la vérification de ses conséquences.

8. **Forces.** — On appelle *force* toute cause capable de produire le mouvement ou d'en modifier la nature.

Dès lors, l'existence d'une force peut nous être révélée par des phénomènes très-divers. — Si un point matériel, primitivement en repos, se met en mouvement, c'est qu'une force agit sur lui; si un point matériel est animé d'un mouvement rectiligne et accéléré, c'est qu'une force agit sur lui dans le sens même du mouvement, etc. — Nous allons voir maintenant, dans les cas où les points soumis à l'action des forces sont assujettis de façon à rester immobiles, l'existence des forces se manifester par des effets d'une nature particulière.

9. **Divers effets des forces. Égalité de l'action et de la réaction.** — Quand un corps pesant est placé sur un plan horizontal, la résistance du plan empêche le corps de se mettre en mouvement, sous l'action de son poids, comme il le ferait s'il était libre; il se produit alors une *pression*, capable de fléchir le plan, ou même de le rompre si le poids du corps dépassait une certaine limite.—A son tour, le plan réagit sur le corps qui le presse, et cette *réaction* constitue une force égale et contraire à la pression elle-même; car, si le plan n'existait pas, il faudrait appliquer au corps une force égale et contraire à son poids, pour l'empêcher de se mettre en mouvement.

Un corps pesant, suspendu à l'extrémité d'un fil et en repos, produit sur ce fil une *tension*, capable de rompre le fil si le poids du corps dépassait une certaine limite. — A son tour, le fil exerce une *réaction* égale et contraire; car, si le fil n'existait pas, il faudrait appliquer au corps une force égale et contraire à son poids, pour le maintenir en repos.

Le corps pesant suspendu au ressort représenté par la figure 3 produit sur lui une *flexion*. — Le ressort, par son élasticité, exerce une *réaction* égale et contraire ; car, si l'on supprimait le ressort, on devrait appliquer au corps une force égale et contraire à son poids, pour l'empêcher de se mettre en mouvement.

Ces exemples suffisent pour montrer que les effets des forces sur les corps peuvent être assez divers, selon la nature des liaisons auxquels ils sont assujettis. —Quant au développement d'une *réaction*, qui apparaît dans chacun de ces trois cas comme égale et contraire à l'*action* exercée par la pesanteur, Newton a montré que c'est là un principe absolument général, applicable à des forces quelconques, et dans l'état de mouvement aussi bien que dans l'état de repos.

10. **Mesure des forces**. —On dit que deux forces sont *égales*, lorsque, agissant sur un même corps dans les mêmes conditions, elles produisent un même effet.

Pour comparer entre elles des forces inégales, il faut admettre le principe suivant, qui est d'ailleurs confirmé par l'observation et par la vérification de toutes ses conséquences : ***lorsque plusieurs forces agissent simultanément sur un point matériel, l'action de chacune d'elles est [la même que si elle agissait seule.***

Ce principe étant admis, on dit qu'une force F est égale à *n fois* une autre force *f*, lorsqu'elle produit, dans les mêmes conditions, le même effet que *n* forces égales à *f*, agissant simultanément.

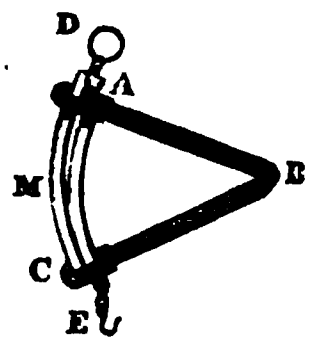


Fig. 2.

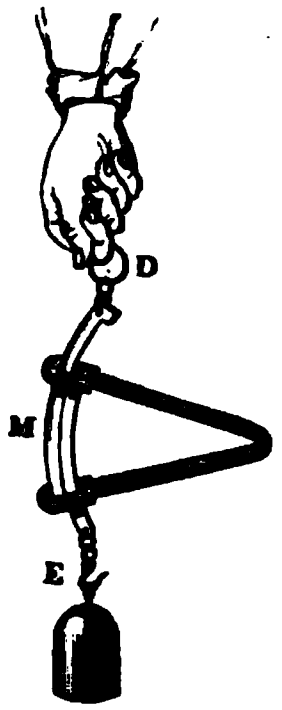


Fig. 3.

11. **Dynamomètres**. — On désigne sous le nom de *dynamomètres* des instruments qui sont destinés à mesurer les forces par les effets de flexion qu'elles font éprouver à un ressort.

La figure 2 représente un dynamomètre formé d'une lame d'acier flexible ABC, recourbée en forme de V : de chacune des extrémités A, B, de cette lame, part un arc métallique qui traverse une ouverture pratiquée près de l'autre extrémité. L'un de ces arcs se termine par un anneau D, qui sert à soutenir l'instrument (*fig.* 3), l'autre par un crochet E, auquel on peut

suspendre des poids ou appliquer les forces qu'on se propose de comparer. — On suspend successivement au crochet des poids de 1, 2, 3, 4 kilogrammes, etc.; le ressort s'infléchit de plus en plus, et l'on marque chaque fois le point de l'arc extérieur MD qui correspond à l'ouverture de la branche A qu'il traverse. Le dynamomètre étant ainsi gradué, si l'on attache l'anneau à un point fixe, à l'aide d'une corde R, par exemple (*fig.* 4), et qu'on applique au crochet une force quelconque par l'intermédiaire d'une autre corde S, il se produit, comme précédemment, une flexion du ressort : si cette flexion est égale à celle que déterminait un poids de 2, 4, 10 kilogrammes, on dira que *l'intensité de la force est de* 2, 4, 10 *kilogrammes*.

On emploie quelquefois aussi un dynamomètre (*fig.* 5) dont le ressort a la forme d'une hélice (ressort à boudin); l'une des extrémités s'appuie contre la base supérieure A d'un cylindre métallique AB, auquel est fixé le crochet E; l'autre extrémité sur un disque plan P, qui porte en son centre une tige verticale terminée par un anneau D. Cette tige occupe l'axe commun du ressort et du cylindre, et traverse librement la base supérieure de ce dernier; elle sort d'une quantité plus ou moins grande, suivant que la force appliquée au crochet est elle-même plus ou moins considérable.

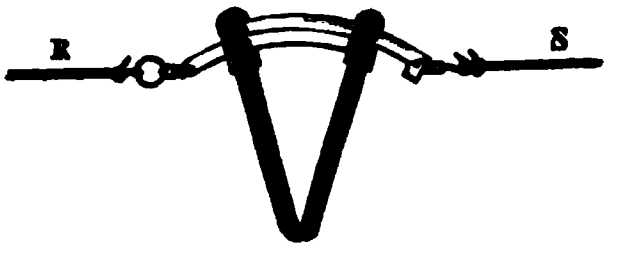


Fig. 4.

Fig. 5.

12. Une force constante, agissant seule sur un point matériel, lui imprime un mouvement uniformément accéléré. — La démonstration de ce théorème repose sur le principe suivant, qu'on doit considérer comme vérifié par la vérification de ses conséquences : *l'action d'une force sur un point matériel est indépendante du mouvement dont ce point est animé; elle est la même que si le point était au repos*.

Ce principe étant admis, soit une force F, agissant sur un point matériel que l'on peut, par exemple, supposer d'abord au repos : cette force lui imprime, au bout d'une seconde, une vitesse γ. Si la force cessait alors d'agir, le point continuerait à se mouvoir, d'un mouvement rectiligne et uniforme, avec la vitesse γ (7, 2°); si donc la force F agit sur lui pendant un nouvel intervalle de temps égal à une seconde, son action étant indépendante du mouvement dont le point est animé, elle lui communique, au bout de ce temps, une nouvelle vitesse γ s'ajoutant à la première, en sorte que la vitesse au bout de deux secondes est 2γ, et ainsi de suite Donc, au bout du temps t, la vitesse est

$$v = \gamma t$$

et le mouvement est uniformément accéléré.

Il est clair que la démonstration s'applique également au cas où le corps serait animé d'une vitesse initiale v_0; dans ce cas, la vitesse au bout du temps t serait exprimé par $v_0 + \gamma t$.

13. **Deux forces constantes sont entre elles comme les accélérations qu'elles impriment à un même mobile.** — Soit deux forces F, F'; supposons qu'elles aient une commune mesure f, et qu'on ait

$$F = nf, \quad F' = n'f, \quad \text{et par suite } \frac{F}{F'} = \frac{n}{n'}.$$

Si la force f agissait seule sur le mobile considéré, elle lui imprimerait un mouvement uniformément accéléré, dont nous pouvons représenter l'accélération par α. Donc, si n forces égales à f agissent simultanément sur ce même mobile, puisque l'action de chacune d'elles est indépendante de celle des autres, elles lui imprimeront une accélération n fois plus grande, c'est-à-dire $n\alpha$. De même, si n' forces égales à f agissent simultanément sur le même mobile, l'accélération produite sera $n'\alpha$. On a donc, en désignant par γ et γ' les accélérations imprimées par F et F',

$$\gamma = n\alpha, \quad \gamma' = n'\alpha :$$

on en déduit :

$$\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{n}{n'},$$

et par suite

$$\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{F}{F'}$$

Ce principe étant démontré pour le cas où les forces ont entre elles une commune mesure, quelque petite qu'elle soit, nous le considérerons par cela même comme général.

14. **Masse.** — L'équation que nous venons d'obtenir peut s'écrire

$$\frac{F}{\gamma} = \frac{F'}{\gamma'}.$$

Or, si l'on faisait agir sur le même corps une autre force F'', le rapport de cette force à l'accélération γ'' qu'elle produirait serait encore le même : on a donc, pour toutes les forces appliquées à un même corps,

$$\frac{F}{\gamma} = \frac{F'}{\gamma'} = \frac{F''}{\gamma''} = \ldots = m.$$

La valeur m de ce rapport constant est ce qu'on nomme la *masse* du corps.

On appelle donc *masse* d'un corps *le nombre constant qui exprime le rapport d'une force quelconque à l'accélération qu'elle imprime à ce corps.* — La valeur de ce nombre dépend : 1° du choix de l'*unité de force* :

l'unité ordinairement adoptée est le kilogramme ; 2° du choix de l'*unité de longueur* et du choix de l'*unité de temps*, puisque l'accélération est la variation éprouvée par la vitesse dans l'unité de temps : l'unité de longueur ordinairement adoptée est le mètre, l'unité de temps est la seconde.

Si maintenant on considère, en particulier, parmi les forces qui peuvent agir sur un corps, celle qui résulte de l'action de la pesanteur sur lui, c'est-à-dire son poids P, et si l'on désigne par g l'accélération qu'il prend sous cette action (accélération que nous verrons être la même pour tous les corps tombant librement, en un même lieu), on aura

$$\frac{P}{g} = m.$$

On peut donc appeler, en particulier, *masse* d'un corps *le rapport de son poids à l'accélération qu'il prend sous l'action de la pesanteur seule.*

Enfin, on peut se demander quelle est l'*unité de masse* déterminée par les divers choix d'unités qui viennent d'être indiquées. — Or, si l'on considère un corps dont la masse est exprimée par 1, on doit avoir, pour ce corps, $P = g$. L'unité de masse est donc la masse d'un corps dont le poids en un lieu déterminé est exprimé, en unités de poids, par le nombre qui exprime l'accélération de la chute libre, en unités de longueur, dans le même lieu. Par exemple, l'accélération de la chute des corps à Paris est, comme on le verra, $9^{m},8088$; l'unité de masse est donc la masse d'un corps qui pèse, à Paris, $9^{kil},8088$.

15. **Mesure des forces constantes, par les accélérations qu'elles impriment.** — Outre l'emploi des *dynamomètres*, qui permettent de mesurer les forces constantes par les flexions qu'elles produisent sur un ressort en équilibre (11), nous avons maintenant un moyen de mesurer les forces par l'observation des mouvements qu'elles impriment à un corps soumis à leur action. — Soit un corps dont on connaisse le poids P : en divisant le nombre P par le nombre g qui exprime l'accélération due à la pesanteur dans le même lieu, on connaîtra sa masse $m = \frac{P}{g}$. Dès lors, si l'on observe l'accélération γ qu'imprime à ce même corps la force qu'on se propose de mesurer, lorsqu'elle agit seule sur lui, on aura, entre la valeur inconnue F de la force et l'accélération connue γ, la relation

$$\frac{F}{\gamma} = m$$

d'où l'on déduira la valeur de la force

$$F = m\gamma.$$

16. Représentation géométrique des forces. — Une force est complétement définie, si l'on donne : 1° son *point d'application*, c'est-à-dire le point sur lequel s'exerce directement son action ; 2° sa *direction*, c'est-à-dire la direction du mouvement que cette force, agissant seule, tend à imprimer à ce point; 3° son *intensité*, c'est-à-dire sa valeur numérique, évaluée à l'aide de l'unité de force.

On représente géométriquement une force par une droite partant du point d'application, dirigée suivant la direction même de la force, et égale à autant de fois l'unité de longueur que la force contient de fois l'unité de force.

Lorsqu'une force appliquée en un point A d'un corps solide (*fig.* 6) le sollicite dans la direction AF, on voit aisément que l'effet de cette force ne sera pas changé, si l'on vient à transporter son point d'application en un autre point C ou B du corps, situé sur la même direction : il en serait encore de même si l'on appliquait la force en un point D extérieur au corps, pourvu que ce point fût supposé lié invariablement au corps. — En d'autres termes, *le point d'application d'une force peut toujours être transporté en un point quelconque de sa direction, pourvu qu'on suppose ce point lié invariablement au premier.*

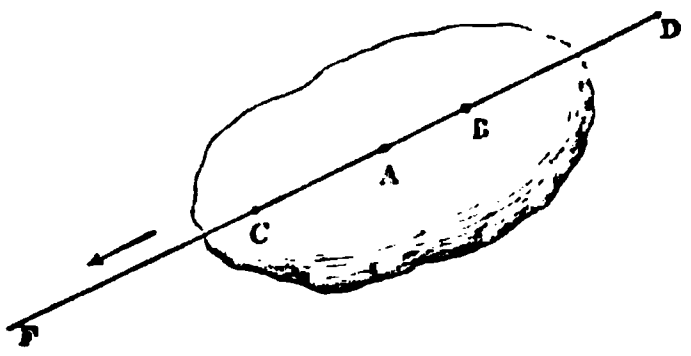


Fig. 6.

17. Composition des forces appliquées en un même point. — On démontre, en Mécanique, que si plusieurs forces sont appliquées en un même point, elles peuvent toujours être remplacées par une force unique ou *résultante*, produisant à elle seule le même effet que toutes les autres agissant simultanément.

Nous nous contenterons d'énoncer, sans démonstration, les règles qui permettent d'obtenir la résultante de plusieurs forces appliquées en un même point, dans les divers cas qui peuvent se présenter :

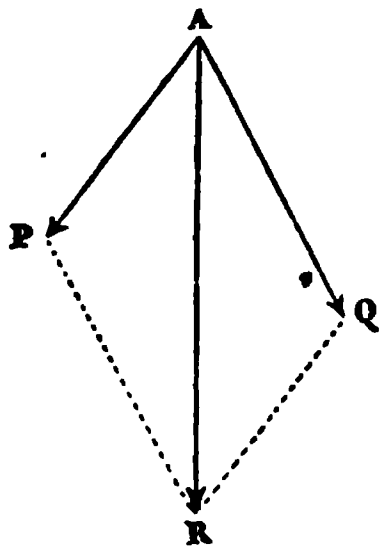


Fig. 7.

1° *Deux forces appliquées en un point, dans la même direction et dans le même sens, ont une résultante égale à leur somme, et agissant dans la même direction et dans le même sens que les forces proposées ;*

2° *Deux forces appliquées en un même point, dans la même direction et en sens contraire, ont une résultante égale à leur différence, agissant dans la même direction, et dans le sens de la plus grande des deux forces proposées ;*

3° *Deux forces* P, Q (*fig.* 7) *appliquées en un même point* A, *dans des di-*

rections différentes, ont une résultante représentée, pour sa grandeur, sa direction et son sens, par la diagonale AR ***du parallélogramme qui a pour côtés adjacents les deux forces proposées.***

Dès lors, pour obtenir la résultante d'un nombre quelconque de forces appliquées en un même point, il suffit de composer d'abord deux de ces forces en une seule; puis la résultante partielle ainsi obtenue avec une troisième force, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on ait réduit toutes les forces à une seule, qui est la résultante du système tout entier.

18. Composition des forces parallèles. — 1° *Deux forces parallèles et de même sens* P, Q (*fig.* 8) *appliquées en deux points* A, B *d'un corps solide, ont une résultante* R *qui leur est parallèle, dirigée dans le même sens qu'elles, égale en grandeur à leur somme, et placée de manière*

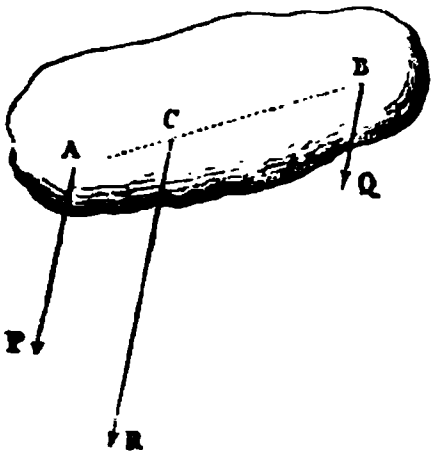


Fig. 8.

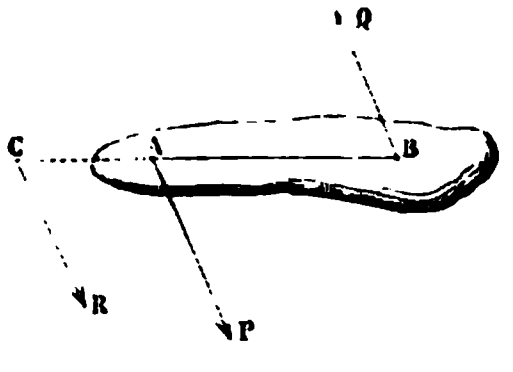


Fig. 9.

qu'elle partage la droite AB *en deux parties* AC, BC, *inversement proportionnelles aux intensités de ces forces* P *et* Q.

2° *Deux forces parallèles, de sens contraire et inégales*, P, Q (*fig.* 9) *appliquées en deux points* A, B *d'un corps solide, ont une résultante R qui leur est parallèle, égale en grandeur à leur différence, dirigée dans le sens de la plus grande, et placée de manière qu'elle rencontre le prolongement de la droite* AB *en un point* C, *tel que les distances* AC, BC, *soient inversement proportionnelles aux intensités de ces forces* P *et* Q.

Pour composer ensemble un nombre quelconque de forces parallèles et dirigées dans le même sens, p, p', p'', ... (*fig.* 10), appliquées en divers points A, B, C... d'un corps solide, il suffit de composer d'abord deux de ces forces, p, p', en une seule r; puis cette résultante partielle avec une troisième force p'', et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on ait réduit toutes les forces à une seule R, qui est la résultante du système (*).

(*) Si l'on a des forces parallèles dirigées, les unes dans un sens, les autres en sens contraire, on composera d'abord les premières en une résultante R, qui sera dirigée dans le même sens qu'elles; puis, les secondes, en une résultante R', qui sera dirigée en sens contraire de R; si ces deux forces R et R' sont inégales, elles auront une résultante, égale à leur différence, qui sera la résultante définitive du système. Si elles sont égales, et non situées dans le prolongement l'une de l'autre, elles constitueront un *couple*, tendant, comme on l'indiquera plus loin, à produire un mouvement de rotation (20); elles ne pourront donc être remplacées par une résultante unique.

19. Centre des forces parallèles. — Soit un certain nombre de forces parallèles p, p', p'',... (*fig.* 10), appliquées aux points A, B, C..., et supposons qu'on change la direction commune de ces forces (comme l'indiquent les lignes marquées sur la figure en traits discontinus) sans changer, ni leurs points d'application, ni leur parallélisme, ni leurs rapports d'intensité. On voit immédiatement que le point D de la droite AB, par lequel passe la première résultante partielle r ne sera pas changé, puisque la position de ce point est simplement déterminée par la relation $\frac{AD}{BD} = \frac{p'}{p}$, et ainsi de suite pour tous les points semblables, jusqu'au point O par lequel doit passer toujours la résultante définitive. Ce point prend alors le nom de *centre des forces parallèles*.

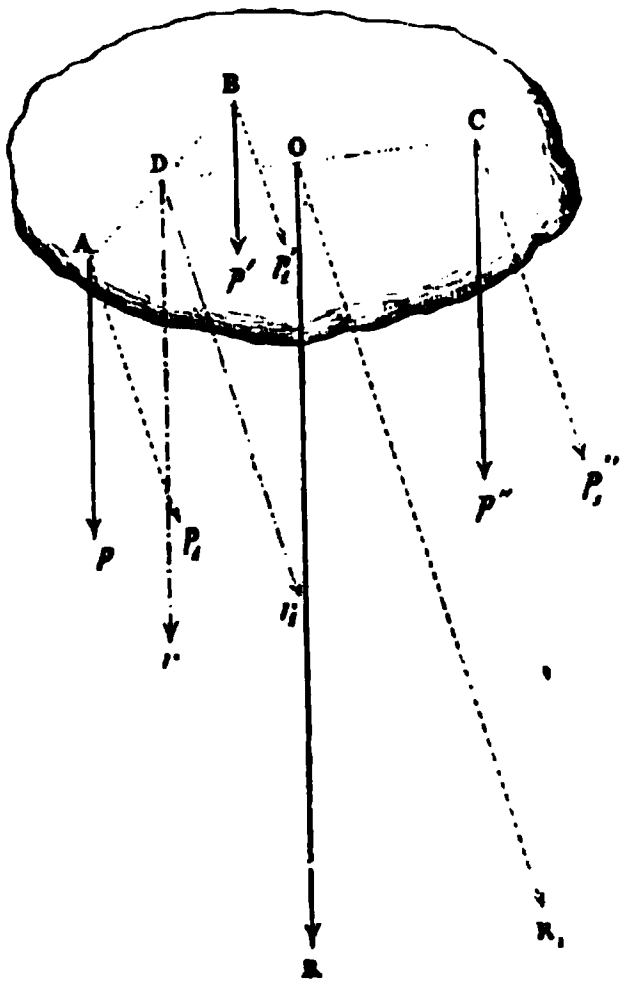


Fig. 10.

On appelle donc *centre des forces parallèles*, pour un corps solide déterminé, *un point par lequel passe constamment la résultante d'un système de forces parallèles appliquées en des points déterminés de ce corps, lorsqu'on change la direction commune de ces forces, sans changer leur parallélisme, ni leurs rapports d'intensité.*

20 Couples. — On donne le nom de *couple* à un système de deux forces parallèles, P, P′ (*fig.* 11), de sens contraire et *égales*, appliquées en deux points différents A, B d'un corps solide, et ayant une direction différente de celle de la droite AB qui joint leurs points d'application. Un pareil système ne peut être remplacé par une force résultante unique; il tend à imprimer au corps un mouvement de rotation.

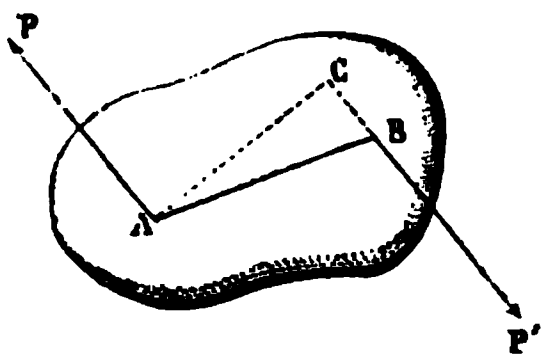


Fig. 11.

On nomme *bras de levier* d'un couple la longueur AC de la perpendiculaire commune aux deux forces. — On appelle *moment* d'un couple le produit de l'une des forces P, mesurée en unités de force, par la longueur du bras de levier AC, mesuré en unités de longueur.

On démontre en Mécanique : 1° qu'un couple peut être remplacé par tout autre couple de même moment, situé dans son plan ou dans un plan parallèle, pourvu que les points d'application du second soient

supposés liés aux points d'application du premier, d'une manière invariable ; 2° que deux couples sont entre eux comme leurs moments.

De ces deux théorèmes, on déduit immédiatement qu'*un couple a pour mesure son moment*. Il faut entendre par là que, si l'on prend pour unité, dans la mesure des couples, le couple qui a pour force l'unité de force et pour bras de levier l'unité de longueur, le nombre qui exprime la mesure d'un couple déterminé est égal au produit du nombre qui exprime la mesure de la force, en unités de force, par le nombre qui exprime la mesure du bras de levier, en unités de longueur.

21. **Composition des forces de directions quelconques, appliquées en des points différents d'un même corps.** — Des forces en nombre quelconque, appliquées en divers points d'un même corps et suivant des directions quelconques, n'ont généralement pas de résultante, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent être réduites à une force unique. Mais on démontre qu'elles peuvent toujours se réduire *à un couple et à une force non située dans le plan du couple*.

C'est donc seulement dans certains cas particuliers que le système de toutes les forces appliquées à un même corps peut se réduire, soit à un couple unique, soit à une force unique. — On a vu, par exemple, que les forces appliquées en un même point peuvent toujours être remplacées par une force résultante (17). Il en est évidemment de même, quand les forces sont appliquées en des points différents du corps, mais ont des directions *concourantes*, c'est-à-dire quand leurs directions passent toutes par un même point ; en effet, on peut toujours les considérer comme appliquées toutes à ce point de concours (16), et par suite on peut toujours les composer en une résultante unique, passant par ce point.

22. **Équilibre.** — Lorsque des forces, agissant simultanément sur un corps complétement libre, se neutralisent de telle façon, que tout se passe comme si ces forces n'existaient pas, on dit qu'elles se font *équilibre*.

Quand *toutes* les forces qui sollicitent un corps se font équilibre, ce corps est, ou en repos, ou animé d'un mouvement uniforme (7).

Deux forces égales et de sens contraire, appliquées en un même point d'un corps, se font évidemment équilibre. On en peut dire autant de deux forces agissant en sens contraire aux deux extrémités d'une droite matérielle et dans la direction même de cette droite.

En général, *toutes les fois que des forces se font équilibre sur un corps parfaitement libre, chacune d'elles peut être considérée comme égale et directement opposée à la résultante de toutes les autres*.

23. **Travail d'une force dont le point d'application se déplace dans la direction de la force elle-même. — Kilogrammètre.** — Pour caractériser complétement l'effet produit par une force dont le point d'application se déplace, on doit tenir compte, non-seulement de la grandeur de la force, mais aussi du déplacement qu'éprouve son point d'application pendant un temps déterminé. — De là, la notion du *travail*. Nous

en dirons quelques mots, en nous bornant au cas où le point d'application se déplace dans la direction même de la force.

Soit deux poids P et P′, à élever à une même hauteur; si l'on considère comme ayant une valeur déterminée le travail effectué pour élever à cette hauteur le poids pris pour unité, il est évident que le travail effectué en élevant le poids P aura une valeur égale à la première multipliée par P, et que le travail effectué en élevant le poids P′ aura une valeur égale à la première multipliée par P′. — De là, ce premier théorème : *les travaux effectués en élevant différents poids à une même hauteur sont proportionnels à ces poids.*

Soit maintenant un même poids à élever à deux hauteurs différentes H et H′; si l'on considère comme ayant une certaine valeur le travail effectué en élevant ce poids à la hauteur prise pour unité, le travail effectué en l'élevant à la hauteur H aura une valeur égale à la première multipliée par H, et le travail effectué en l'élevant à la hauteur H′ aura une valeur égale à la première multipliée par H′. — De là, ce second théorème : *les travaux effectués en élevant un même poids à différentes hauteurs sont proportionnels à ces hauteurs.*

Soit maintenant T le travail effectué en élevant un poids P à une hauteur H, et T′ le travail effectué en élevant un poids P′ à une hauteur H′; cherchons le rapport de T à T′. — Pour cela, prenons comme inconnue auxiliaire le travail T_1, qui correspondrait à l'élévation du poids P′ à la hauteur H : on aura, d'après ce qui précède,

$$\frac{T}{T_1} = \frac{P}{P'}$$

et aussi

$$\frac{T_1}{T'} = \frac{H}{H'}$$

En multipliant ces égalités membre à membre, et supprimant le facteur commun T_1, il vient

$$\frac{T}{T'} = \frac{P \times H}{P' \times H'}$$

De là, ce troisième théorème : *les travaux effectués en élevant des poids différents à des hauteurs différentes sont entre eux comme les produits de chacun des poids par la hauteur à laquelle il a été élevé.*

Convenons maintenant de prendre pour *unité de travail* le travail effectué en élevant 1 kilogramme à une hauteur de 1 mètre; cette unité de travail est ce qu'on nomme le *kilogrammètre*. En faisant P′ = 1 et H′ = 1 dans la relation précédente, il vient

$$\frac{T}{1 \text{ kilogrammètre}} = \frac{P \times H}{1}.$$

C'est-à-dire que la mesure, en kilogrammètres, du travail effectué en élevant P kilogrammes à H mètres, est égale au produit du poids par la hauteur.

En général, *le travail d'une force constante, dont le point d'application se déplace dans la direction même de la force, a pour mesure, en kilogrammètres, le produit de la force exprimée en kilogrammes par le déplacement exprimé en mètres.*

Lorsque le déplacement a lieu dans le sens même où agit la force, le travail est dit *moteur*. Lorsque le déplacement a lieu en sens inverse de l'action de la force, le travail est dit *résistant*. — Ainsi, lorsqu'un corps pesant est animé d'un mouvement vertical de haut en bas, le travail de son poids est un travail moteur; lorsqu'il est animé d'un mouvement vertical de bas en haut, le travail de son poids est un travail résistant. — De même, lorsqu'un corps animé d'un mouvement vertical de haut en bas est soumis à des pressions verticales dirigées, les unes de haut en bas, les autres de bas en haut, les travaux des premières sont des travaux moteurs, les travaux des secondes sont des travaux résistants : c'est le contraire si le mouvement du corps a lieu de bas en haut.

NOTIONS SUR LA CONSTITUTION ET LES DIVERS ÉTATS DES CORPS

24. Constitution des corps. — Atomes. — Tous les corps qui sont accessibles à nos sens sont *divisibles*, et il est des cas où cette division peut être poussée extrêmement loin : ainsi, un morceau de craie qu'on pulvérise se réduit en une poussière dont l'œil nu a peine à distinguer les grains ; cependant le microscope nous montre encore, dans chacun d'eux une masse dont notre esprit conçoit la divisibilité.

Quelques autres exemples, invoqués de tout temps par les physiciens, constatent l'extrême divisibilité de certaines substances. — Une goutte de carmin colore, d'une manière sensible, plusieurs litres d'eau ; chaque litre peut se partager en des millions de gouttes, et chacune d'elles contient, en tous ses points, des particules de la goutte de carmin. — Un grain de musc répand, dans un appartement, une odeur chassée sans cesse par les courants d'air, et sans cesse renouvelée ; cette odeur est due à des particules du corps, qui viennent se mettre en contact avec l'organe de l'odorat, et pourtant la somme de toutes celles qui se sont ainsi détachées, au bout de plusieurs années, est assez petite pour que le grain de musc n'ait perdu qu'une fraction presque insensible de son poids.

Bien que la division de la matière puisse être suivie très-loin dans certains cas, et que notre esprit puisse d'ailleurs concevoir un état de division encore plus reculée, toutes les notions aujourd'hui acquises à la

science tendent à faire admettre une limite qu'on ne pourrait franchir, et l'existence, dans tous les corps, de parties assez ténues pour que la matière y soit indivisible. — On a nommé *atomes* (ἀ négatif, τέμνω, couper) les particules extrêmement petites qui représenteraient le dernier degré de division, et dont l'ensemble constituerait les corps.

25. **Atomes simples. — Atomes composés.** — Pour mieux préciser le sens du mot *atome*, il est important de remarquer que, pour certaines substances, nous savons effectuer la division de deux façons essentiellement distinctes. — Le fragment de craie, réduit par une opération purement mécanique en fragments de plus en plus petits, fournit toujours des parties semblables à l'ensemble, et possédant les mêmes propriétés; il en serait de même d'une goutte d'eau pure, qu'on partagerait en gouttelettes de plus en plus fines, et l'on doit admettre que cette similitude se retrouverait encore entre les atomes. — Au contraire, lorsqu'on chauffe la craie dans un four, comme le fait le chaufournier, ou mieux encore dans un vase disposé de façon à recueillir les produits qui s'en échappent, comme on le fait dans les laboratoires, on constate qu'il se dégage un gaz (l'acide carbonique), et il reste un corps solide (la chaux), qui a des propriétés tout à fait différentes de celles de la craie. De même, en soumettant l'eau à l'action d'un courant électrique, nous verrons qu'on la décompose en deux gaz différents (l'oxygène et l'hydrogène), dont les propriétés n'ont plus rien de commun avec celles de l'eau.

Ce dernier mode de division est donc essentiellement distinct de la division mécanique, et il est naturel d'admettre, pour l'eau par exemple, que chacun des atomes de ce liquide était primitivement formé d'atomes d'oxygène et d'atomes d'hydrogène, qui se sont séparés sous l'influence de l'électricité, mais qui formaient par leur réunion l'atome d'un corps différent, l'eau. Le même raisonnement est applicable à la craie.

Or, parmi les corps connus, il en est qu'on n'a jamais pu décomposer en éléments différents : tels sont l'oxygène, l'hydrogène, le soufre, le fer, etc. ; on les nomme *corps simples*, et leurs atomes sont considérés comme des *atomes simples*. — Au contraire, les corps qui peuvent, comme la craie et l'eau, fournir plusieurs corps simples, sont des *corps composés*, et leurs atomes sont des *atomes composés*.

26. **But de la physique.** — C'est à la chimie qu'appartient spécialement l'étude des lois qui président aux décompositions du genre de celles que nous venons de citer en dernier lieu, et aux groupements qui forment les atomes composés. Le but essentiel de la chimie est de chercher à connaître les propriétés spéciales de chaque corps en particulier, c'est-à-dire celles qui peuvent porter les atomes des divers corps à s'unir entre eux, ou à se séparer les uns des autres (*propriétés chimiques*).

La *physique* au contraire, sans entrer dans l'examen de ces propriétés spéciales à chaque corps, sans même faire de distinction entre les corps simples ou composés, étudie seulement les phénomènes qui se produisent

sans que la constitution intime des corps éprouve de modification (*). — Nous aurons occasion de citer de nombreux exemples où cette distinction est facile à faire.

On substitue souvent, surtout en Physique, au mot *atomes* le mot *molécules* (diminutif de *moles*, masse) : ces deux expressions, dans tous les cas où nous aurons à en faire usage, peuvent être regardées comme synonymes; nous emploierons plus volontiers celle de *molécules*, pour indiquer d'une manière générale les petites parties dont l'ensemble forme un corps, quelle que soit d'ailleurs la constitution, simple ou composée, de ces parties.

27. **Les corps doivent être considérés comme formés de molécules situées à distance.** — Tous les corps éprouvent une diminution de volume quand on exerce sur eux une pression mécanique suffisante : c'est ce qu'on exprime en disant que tous les corps *sont compressibles*. — Tous les corps *éprouvent des variations de volume quand on fait varier leur température*. — Ces deux propriétés, dont nous établirons plus loin la généralité, se conçoivent facilement si l'on admet qu'il existe, entre les molécules, des intervalles que les actions mécaniques ou les variations de température peuvent augmenter ou diminuer. Il serait au contraire difficile de s'en rendre compte, si l'on supposait la matière parfaitement continue, c'est-à-dire chaque molécule en contact, par tous les points de sa surface, avec celles qui l'environnent. — Enfin, ces notions sur la constitution des corps seront confirmées par l'étude des divers phénomènes que nous aurons à analyser dans la suite.

On nomme *pores intermoléculaires* les intervalles dont nous venons de faire concevoir l'existence. Bien que ces pores aient probablement des dimensions considérables par rapport à celles des molécules qu'ils séparent, ils ne sont pas plus accessibles à l'observation directe que les molécules elles-mêmes.

On doit donc se garder de confondre les pores intermoléculaires avec ces vides qui forment des cavités appréciables à l'œil ou au microscope, dans certaines substances vulgairement appelées *poreuses*, comme les poteries non vernissées, la plupart des pierres, le bois, etc.; on remarque, d'une substance à l'autre, des différences entre les dimensions de ces cavités, qui expliquent pourquoi certains corps se laissent plus facilement pénétrer que d'autres par les liquides ou par les gaz. — Nous ajouterons enfin qu'il existe de semblables cavités dans les corps où l'on serait le moins porté à en soupçonner l'existence : ainsi, en comprimant très-fortement de l'eau dans une sphère d'or, les membres de l'Académie del

(*) On nomme *phénomène* (φαίνομαι, paraître), dans le langage scientifique, une *simple manifestation des propriétés des corps* : peu importe d'ailleurs que cette manifestation se produise dans des circonstances anormales ou régulières, qu'elle soit passagère ou durable.

Cimento, à Florence, virent le liquide perler en gouttelettes à travers le métal.

28. **Divers états des corps.** — Les corps se présentent à nous sous trois états physiques : l'*état solide*, l'*état liquide*, l'*état gazeux*.

1° *État solide.* — On nomme état solide celui d'un corps *dont le volume et la forme demeurent constants*, quelque grandes que soient les forces qui lui sont appliquées.

Les corps sur lesquels nous pouvons opérer ne sont jamais rigoureusement conformes à cette définition : mais quand on exerce, par exemple, des pressions extérieures très-énergiques sur la surface d'une masse de fer, d'ivoire ou de marbre, la forme et le volume éprouvent des variations qui sont toujours très-petites, et qui disparaissent dès que les pressions extérieures sont supprimées, pourvu que ces pressions n'aient pas dépassé une certaine limite de grandeur, variable avec la nature du corps. — On nomme *élasticité* cette propriété en vertu de laquelle des corps, momentanément déformés par des actions extérieures, reprennent leur forme primitive lorsque ces actions cessent.

2° *État liquide.* — On nomme état liquide celui d'un corps *dont le volume demeure constant*, quelles que soient les forces qui lui sont appliquées, mais *dont la forme dépend essentiellement de celle des parois solides avec lesquelles il est en contact.*

Les corps liquides sur lesquels nous pouvons opérer, comme l'eau, le mercure, n'éprouvent, sous l'action des pressions énergiques exercées sur eux, que des variations de volume à peu près insensibles : ils reviennent d'ailleurs à leur volume primitif, dès que ces pressions sont supprimées. — Leur *forme* est, au contraire, essentiellement variable. Si l'on introduit la main, ou un corps quelconque, dans un vase contenant de l'eau, on n'éprouve qu'une résistance facile à vaincre : le liquide se déplace, mais en conservant un volume constant, comme le montre l'ascension de sa surface. Il en est de même quand on fait passer successivement une même masse liquide dans différents vases ; elle se moule sur les formes diverses de ces vases, en conservant toujours le même volume.

3° *État gazeux.* — On appelle état gazeux celui d'un corps, comme l'air, *dont la forme et le volume sont essentiellement variables, et qui tend à occuper tout l'espace dans lequel il est enfermé.*

Un gaz exerce toujours, sur les enveloppes qui le contiennent, un effort tendant à les agrandir : c'est cet effort qu'on nomme la *tension* du gaz, ou sa *force élastique.* — Cette propriété des gaz peut être manifestée par l'expérience suivante : on prend une vessie fermée par un robinet *r* (*fig.* 12), et contenant un peu d'air ou d'un gaz quelconque ; on la place sous une cloche de verre, s'appliquant exactement sur un plateau au centre duquel vient s'ouvrir le conduit d'une sorte de pompe à gaz, la *machine pneumatique*, qui sera étudiée plus loin. Si, au moyen de cette machine, on

enlève l'air qui environne la vessie, on la voit céder à la tension du gaz intérieur, et se gonfler jusqu'à remplir à peu près complétement la cloche ; si on laisse rentrer un peu d'air, en ouvrant le robinet R, la vessie s'affaisse de nouveau. On en doit donc conclure que, si la force élastique du gaz intérieur ne se manifeste pas par une distension de la vessie quand elle est à l'air libre, c'est que cette force élastique est équilibrée par celle de l'air environnant.—Si, au lieu d'une vessie, on emploie une petite ampoule de verre très-mince, pleine de gaz et fermée à la lampe, on la voit éclater quand on fait le vide sous la cloche.

On peut du reste facilement constater, par l'expérience, que la force

Fig. 12.

Fig. 13. — Briquet à air.

élastique augmente, dans les gaz, à mesure que les molécules se rapprochent, ou, en d'autres termes, que *la force élastique d'un gaz augmente quand on diminue son volume.* — Prenons un tube de verre très-épais (*fig.* 13), fermé hermétiquement à l'une de ses extrémités . introduisons par l'extrémité ouverte un piston garni de cuir et bien graissé. Nous enfermerons ainsi un certain volume d'air, et si l'on appuie avec la main sur la tige, on éprouvera de la part du gaz une résistance toujours croissante, à mesure qu'on réduira son volume (*).

(*) Cet instrument a reçu le nom de *briquet à air* : si l'on vient à enfoncer brusque-

29. **Corps fluides.** — D'après ce que nous venons de voir, les corps liquides et les corps gazeux se ressemblent par ce caractère, que leur forme est essentiellement variable, leurs molécules étant douées d'une mobilité parfaite, les unes par rapport aux autres : cette propriété, qui les distingue des corps solides, les fait comprendre sous la dénomination commune de corps *fluides*.

D'un autre côté, il y a entre eux une différence fondamentale. Un corps liquide, défini comme nous l'avons fait plus haut, conserve un volume constant quelles que soient les pressions qui lui sont appliquées; au contraire, le volume d'une masse gazeuse est essentiellement variable avec la pression qu'on lui fait supporter. Aussi, désigne-t-on souvent les liquides sous le nom de *fluides incompressibles*, et les gaz sous le nom de *fluides élastiques* (*).

30. **Changements d'état des corps.**—Nous sommes en général accoutumés à voir chaque corps affecter un état déterminé : c'est ainsi que le plomb, le soufre, se montrent à nous le plus souvent sous l'état solide; le mercure, l'eau, sous l'état liquide, etc. Cependant un grand nombre de corps peuvent passer successivement par deux états différents, ou même par les trois états.— L'eau, par exemple, se présente à l'état de glace pendant les froids de l'hiver; cette glace devient liquide lorsque l'air s'échauffe au retour du printemps, et enfin une partie s'élève dans l'atmosphère à l'état gazeux pendant les chaleurs de l'été. Le refroidissement produit les phénomènes inverses, c'est-à-dire le passage de la vapeur d'eau à l'état liquide ou à l'état solide, sous forme de pluie, de neige ou de grêle.

Le passage d'un état à un autre n'ajoute à l'eau aucun corps nouveau : il n'en élimine aucun élément plus simple.—Ces changements d'état, dont nous montrerons plus loin la généralité, sont donc du domaine de la Physique, ainsi que les causes qui les produisent.

ment le piston dans le tube, il se produit un dégagement de chaleur assez considérable pour allumer un morceau d'amadou fixé à sa base inférieure.

(*) Ainsi qu'on l'a fait remarquer plus haut, les liquides sur lesquels portent nos expériences éprouvent de petites diminutions de volume quand on exerce sur eux des pressions considérables. Ce ne sont donc pas des fluides rigoureusement incompressibles, mais leurs variations de volume sont toujours très-petites par rapport aux variations de pression.

LIVRE PREMIER

PESANTEUR ET HYDROSTATIQUE

CHAPITRE PREMIER

I. — PESANTEUR, CENTRE DE GRAVITÉ, CHUTE DES CORPS

31. Pesanteur. — On donne le nom de *pesanteur* à la cause générale qui sollicite les corps à tomber vers la terre, ou à l'attraction que la terre paraît exercer sur ces corps (*).

Lorsqu'on divise un corps en parties de plus en plus petites, chacune de ces parties est *pesante*, c'est-à-dire qu'elle tombe vers la terre quand aucun obstacle ne s'oppose à sa chute. On est donc conduit à considérer les particules les plus petites dont se compose le corps comme sollicitées chacune par une force tendant à les faire tomber vers la terre.

Nous allons déterminer la *direction* de ces forces. Nous verrons ensuite que les forces de pesanteur appliquées aux divers points d'un même corps peuvent toujours être remplacées par une *résultante unique*, dont nous aurons à déterminer l'intensité et la position par rapport au corps lui-même.

32. Direction de la pesanteur. — Tout corps ou toute parcelle d'un corps, lorsqu'on l'abandonne à l'action de la pesanteur, parcourt dans sa chute une ligne droite, dont la direction se nomme la *verticale*.

Pour déterminer la direction de la verticale passant par un point donné A (*fig.* 14), on applique en ce point un *fil à plomb*, c'est-à-dire un fil flexible auquel on a suspendu un corps quelconque, par exemple un petit cylindre de métal terminé par une pointe conique. Ce fil se place, sous l'action de la pesanteur qui sollicite le corps, dans

Fig. 14.

(*) Certains corps, comme les gaz chauds qui entraînent la fumée, ceux avec lesquels on gonfle les aérostats, tendent à s'éloigner du sol, au lieu de tomber comme

la direction même de la force qui agit sur lui, c'est-à-dire suivant la verticale.

L'observation montre que, en chaque point du globe, *la verticale est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles*. Or la surface des eaux qui recouvrent la plus grande partie du globe est sensiblement sphérique : donc, en chaque point, la direction prolongée de la verticale passe par le centre du globe.

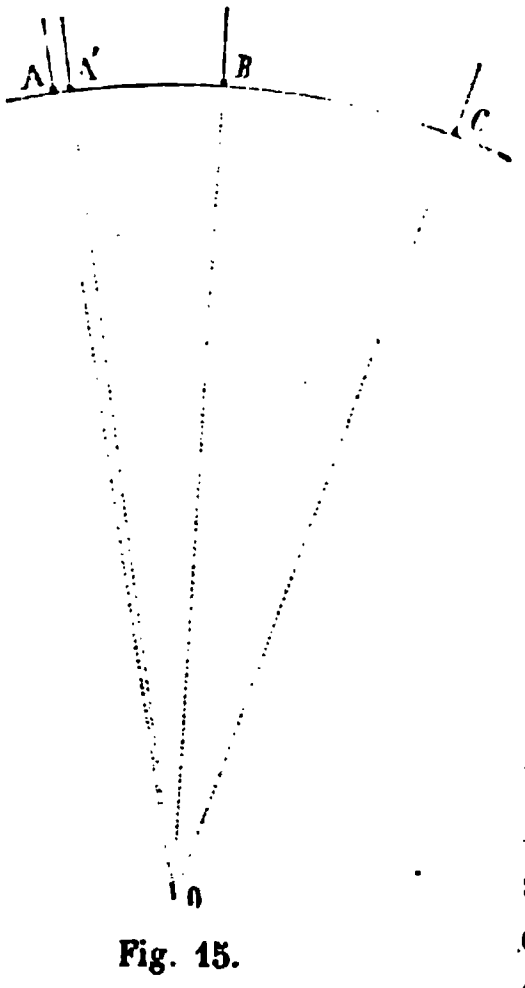


Fig. 15.

Soit AC (*fig.* 15) un arc de grand cercle tracé sur la sphère. Les verticales de deux points A et C, assez éloignés l'un de l'autre, font entre elles un angle très-appréciable; les verticales de deux points plus voisins A et B font entre elles un angle moindre; enfin, l'angle des verticales menées en deux points A et A′ très-voisins l'un de l'autre, ayant pour mesure le rapport de l'arc AA′ à la circonférence entière, est, par là même, très-petit. On voit donc que, dans une même localité, dans une même ville, dans une même salle, toutes les verticales doivent être considérées comme parallèles; à plus forte raison, en est-il ainsi des verticales passant par les divers points d'un même corps.

33. **Résultante des forces de pesanteur; poids des corps.** — Des forces parallèles et de même sens, agissant sur les divers points d'un même corps, ont une résultante qui leur est parallèle, de même sens qu'elles et égale à leur somme (18); donc les forces de pesanteur qui agissent sur les divers points d'un même corps ont une résultante, qui est verticale, dirigée de haut en bas et égale à la somme de ces forces; on la nomme *poids* du corps. — De là, la définition suivante :

Le poids d'un corps est la résultante des actions élémentaires de la pesanteur sur tous les points de ce corps.

34. **Centre de gravité.** — La résultante de tout système de forces parallèles jouit de la propriété de passer par un point qui demeure invariable, quelle que soit la direction de ces forces par rapport au corps, pourvu qu'elles restent parallèles entre elles et qu'elles conservent leurs rapports d'intensité (19). Ce point s'appelle en général le *centre des forces* parallèles; dans le cas des forces élémentaires de pesanteur qui sollicitent les divers points d'un corps, il prend le nom de *centre de gravité*. — Ainsi,

la plupart des autres corps. Ce sont là des exceptions apparentes, qui seront expliquées plus loin.

Le centre de gravité d'un corps est le point par lequel passe constamment la résultante des forces de pesanteur appliquées à ce corps, quelque position que l'on donne au corps dans l'espace et en quelque lieu du globe qu'on le transporte.

La notion du centre de gravité permet de simplifier l'idée que l'on peut se faire du mode d'action de la pesanteur sur un corps. Au lieu d'un système de forces élémentaires, on pourra considérer seulement leur résultante verticale ou le poids du corps, et supposer cette force appliquée toujours au centre de gravité.

35. **Détermination du centre de gravité.** — Lorsqu'un corps est *homogène* (c'est-à-dire lorsqu'il présente dans toutes ses parties le même poids sous un même volume) et qu'il est terminé par une surface géométriquement définie, la Mécanique donne des règles qui permettent de trouver la position de son centre de gravité.

Il est des cas simples où cette position se devine, pour ainsi dire, immédiatement :

Si le corps a un centre de figure, ce point est évidemment le centre de gravité du corps. — Le centre de gravité d'une sphère est donc au centre de cette sphère ; celui d'un parallélipipède, au point de rencontre des diagonales ; celui d'un cylindre droit à bases circulaires, au milieu de la droite qui joint les centres des deux bases.

Si le corps a un plan ou un axe de symétrie, le centre de gravité est évidemment situé dans ce plan ou sur cet axe. — C'est ainsi que le centre de gravité d'une pyramide régulière, ou d'un cône droit à base circulaire, est sur l'axe géométrique du solide ; on démontre, en Mécanique, qu'il se trouve au quart de cet axe à partir de la base.

Enfin, quelle que soit la forme ou la structure d'un corps solide, on en peut déterminer le centre de gravité par le procédé expérimental suivant :

— On suspend le corps par un point A de sa surface à l'extrémité d'un fil flexible B (*fig.* 16) : l'équilibre une fois établi, le fil se trouve tendu suivant la direction même de la force P qui le sollicite : si donc on prolonge dans l'intérieur du corps la direction du fil, ce prolongement passe par le centre de gravité. — On suspend ensuite le corps par un autre point C (*fig.* 17), et l'on prolonge comme précédemment la direction DC. Les deux prolongements, devant passer l'un et l'autre par le centre de gravité, se rencontrent nécessairement, et leur point d'intersection G est le centre de gravité cherché.

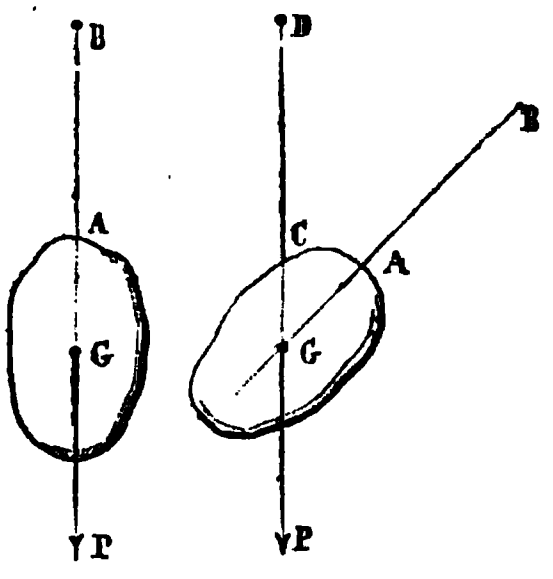


Fig. 16. Fig. 17.

Remarque. — On est souvent conduit à considérer, comme centre

de gravité d'un corps solide, un point qui ne fait pas partie du corps lui-même. Tel est, par exemple, le cas de l'anneau représenté par la figure 18, et dont le centre de figure G est évidemment le centre de gravité. Si l'on veut alors, pour la solution d'une question quelconque, remplacer le système des forces élémentaires qui agissent sur les divers points du corps, par une force unique appliquée en G, il est clair qu'on devra raisonner comme si ce point était lié au corps d'une manière invariable.

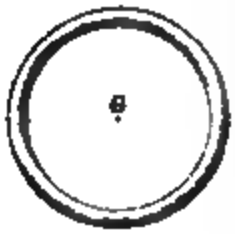


Fig. 18.

36. **Équilibre d'un corps placé sur un plan horizontal.** — La connaissance du centre de gravité d'un corps permet le plus souvent d'exprimer d'une manière simple les conditions d'équilibre, lorsqu'il n'est soumis qu'à l'action de la pesanteur, et que des obstacles connus l'empêchent d'obéir librement à cette action. — C'est ce que nous allons montrer en prenant comme exemples deux des cas les plus fréquents.

Soit un corps reposant sur un plan horizontal par un certain nombre de points A, B, C, D, E, F, G, etc. Construisons un polygone convexe ABDEG (*fig.* 19), dont tous les sommets soient des points d'appui et qui ne laisse d'ailleurs aucun de ces points en dehors de son contour; puis, abaissons du centre de gravité du corps une perpendiculaire sur le plan. La résultante des actions de la pesanteur, dirigée suivant cette perpendiculaire et appliquée au centre de gravité, tend évidemment à rapprocher ce dernier autant que possible du plan fixe; on voit sans peine qu'un semblable

Fig. 19.

Fig. 20.

mouvement est impossible si le pied de la perpendiculaire tombe dans l'intérieur du polygone ABDEG ; dans ce cas, le corps demeure en équilibre. Il se renverse, au contraire, si le pied de la perpendiculaire tombe en dehors du polygone.

Ainsi un prisme oblique P (*fig.* 20), reposant par sa base sur une table horizontale, reste en équilibre si la verticale qui passe par son centre de gravité G rencontre la table en un point I intérieur au polygone de base; il se renverse si, comme pour le prisme P', le pied I' de cette perpendiculaire est extérieur au polygone.

Observons enfin que l'équilibre d'un corps reposant sur un plan horizontal peut présenter deux caractères différents. Tantôt, si l'on écarte tant soit peu le corps de sa position, il y revient par l'action même de son poids ; tantôt, au contraire, pour peu qu'on l'en écarte, il s'en éloigne de plus en plus et tend à se renverser. On dit que l'équilibre est *stable* dans le premier cas, *instable* dans le second. — Ainsi un cône droit, posé par sa base sur un plan horizontal, est en *équilibre stable ;* le même corps, posé sur sa pointe et de façon que la verticale du centre de gravité passe par le point d'appui, est en *équilibre instable*.

37. **Équilibre d'un corps mobile autour d'un axe horizontal.** — Lorsqu'un corps est suspendu par un axe horizontal autour duquel il peut librement tourner, l'équilibre et le mouvement dépendent de la position relative de l'axe et du centre de gravité.

Si l'axe passe par le centre de gravité, le corps est en *équilibre indifférent* dans toutes ses positions autour de l'axe fixe. Car, la direction de la résultante des actions de la pesanteur rencontrant cet axe, il n'y a aucune raison pour que le corps, abandonné au repos, se mette en mouvement dans un sens plutôt que dans le sens opposé : cette résultante ne peut avoir d'autre effet que de déterminer une pression de l'axe sur ses supports.

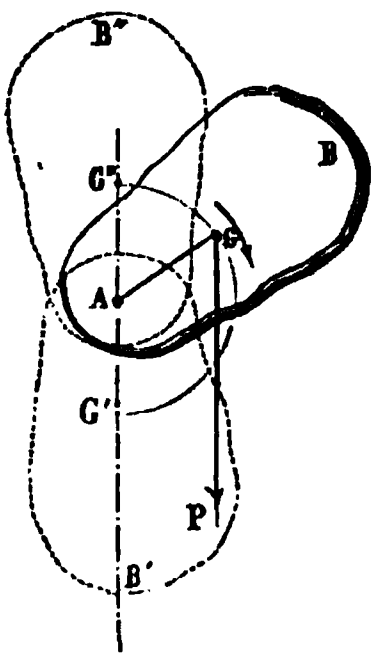


Fig. 21.

Supposons maintenant que l'axe ne passe pas par le centre de gravité. Représentons-nous en A (fig. 21) l'axe fixe perpendiculaire au plan de la figure ; soit AB le corps placé dans une position quelconque, et G son centre de gravité. Le poids P, appliqué en G, tend évidemment à faire tourner le corps autour de l'axe et à entraîner le centre de gravité aussi bas que possible ; il ne saurait donc y avoir équilibre dans cette position. Mais si le corps occupe une des positions AB′ ou AB″, pour lesquelles la verticale de son centre de gravité rencontre l'axe fixe, il y demeure en équilibre ; la symétrie indique, en effet, qu'il n'y a pas de raison pour que son poids l'entraîne dans un sens plutôt que dans l'autre. Mais l'équilibre ne présente pas le même caractère dans ces deux positions. — Lorsque le centre de gravité est situé *verticalement au-dessous* de l'axe de suspension, c'est-à-dire le plus bas possible, en G′, l'équilibre est *stable*, et le corps, écarté de sa position, tend à y revenir sous l'action de son poids dès qu'on l'abandonne à lui-même. — Au contraire, quand le centre de gravité est situé *verticalement au-dessus* de l'axe, c'est-à-dire le plus haut possible, en G″, l'équilibre est *instable*, et le corps, écarté tant soit peu de sa position, s'en éloigne de plus en plus, se renverse et tend vers sa position d'équilibre stable.

38. **Intensité de la pesanteur.** — L'observation la plus vulgaire

montre que, en un même lieu, les poids de divers corps sont en général différents, c'est-à-dire que la résultante des actions de la pesanteur sur les corps varie avec leur volume et avec leur nature : ces variations peuvent être constatées, par exemple, par les différences des flexions imprimées à un même dynamomètre (*fig.* 22).

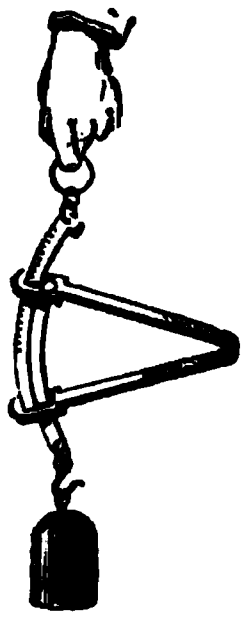


Fig. 22.

Mais l'action de la pesanteur sur les corps dépend, en outre, du point de la surface terrestre où ces corps sont placés. C'est ce que nous allons maintenant établir ; mais, comme les dynamomètres ne sont jamais assez sensibles pour accuser les variations de poids qu'éprouve un même corps en divers points du globe, nous aurons recours à l'observation de la vitesse imprimée aux corps, lorsqu'on les laisse tomber sous l'action de la pesanteur.

39. **Chute des corps dans le vide.** — Lorsqu'on observe la chute de divers corps dans l'air, on reconnaît qu'ils emploient, pour parcourir une même distance verticale, des temps souvent très-différents. Une pierre, par exemple, met moins de temps pour parvenir jusqu'au sol qu'une plume ou qu'une feuille de papier partie du même point ; la feuille de papier elle-même tombe plus vite quand elle est froissée en boule que quand elle est déployée. — Ce dernier exemple fait présumer déjà que les différences dans la vitesse de la chute ne sont pas dues aux différences de poids des corps, car la feuille de papier, qu'elle soit réduite on boule ou déployée, présente toujours le même poids : l'expérience suivante achèvera de prouver qu'on doit les attribuer uniquement à la résistance de l'air.

On prend un gros tube de verre (*fig.* 23), de 2 mètres de longueur environ, fermé à ses deux extrémités par des garnitures de cuivre, dont l'une est munie d'un robinet. On introduit dans ce tube des fragments de divers corps, des grains de plomb, de petits morceaux de papier ou des barbes de plume, etc. ; puis on y fait le vide au moyen de la machine pneumatique. L'appareil étant ainsi préparé, si on le retourne brusquement, tous les corps qu'il contient partent ensemble de l'extrémité supérieure, parcourent la longueur du tube et arrivent ensemble à l'extrémité inférieure. Si l'on ouvre un instant le robinet pour laisser rentrer un peu d'air, et qu'on recommence l'expérience, on voit le papier et les barbes de plume rester en arrière sur les grains de plomb ; le retard est d'autant plus grand qu'il est rentré plus d'air. Enfin, quand on ouvre entièrement le robinet, les différences reparaissent aussi considérables qu'elles le seraient à l'air libre. Ces différences sont donc uniquement dues à la résistance de l'air (*).

(*) Il semble, au premier abord, difficile de comprendre comment des corps dont les poids sont différents peuvent néanmoins tomber dans le vide avec la même

40. Détermination expérimentale des lois de la chute des corps. — Puisque tous les corps prennent, dans le vide, sous l'influence de la pesanteur, des mouvements identiques, il suffit d'étudier les lois de la chute pour *un seul corps*. Mais la détermination de ces lois par une expérience directe, consistant à mesurer les espaces parcourus au bout de temps successifs par un corps tombant dans le vide, présenterait des difficultés pratiques que l'on conçoit sans peine. — On a eu recours à divers artifices, parmi lesquels nous étudierons la machine d'Atwood et l'appareil de M. Morin.

Fig. 23.

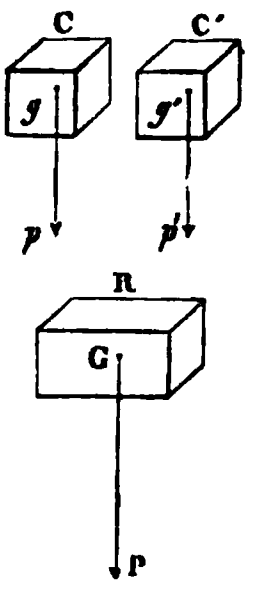


Fig. 24.

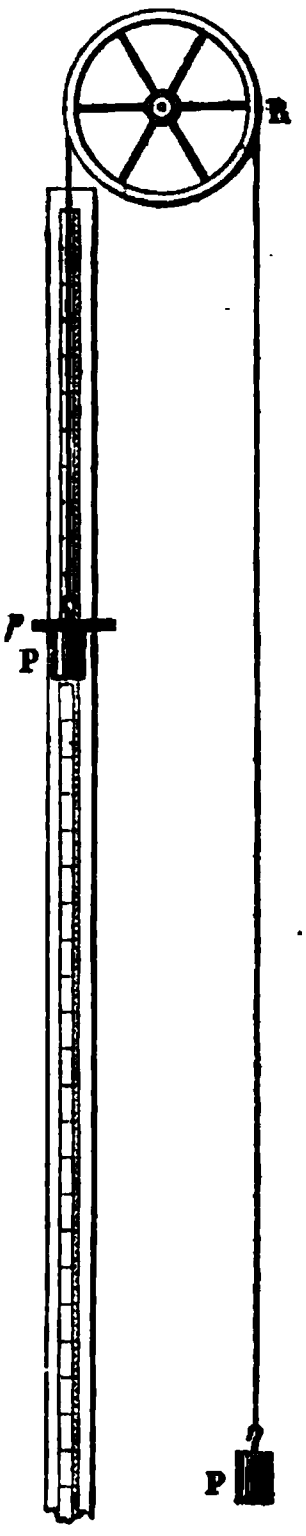


Fig. 25.

41. Principe de la machine d'Atwood. — La machine d'Atwood, réduite à ses éléments essentiels, se compose d'une poulie très-légère R (*fig.* 25), sur laquelle passe un fil de soie très-léger, supportant à ses deux extrémités des poids égaux P, P. On fait en sorte que le mouvement de cette poulie, autour de son axe, ne développe que des frottements négligeables. — Le système étant en repos, si l'on place un poids additionnel p sur l'un des poids P, sur celui de gauche

vitesse. Cette difficulté n'est qu'apparente. — Considérons, en effet, deux corps tout à fait identiques, deux cubes de cuivre C et C' par exemple (*fig.* 24); leurs poids sont des forces égales, p, p', appliquées en leurs centres de gravité respectifs g, g'. Si l'on abandonne ces deux corps à eux-mêmes dans le vide, comme rien ne les distingue l'un de l'autre, ils tomberont évidemment avec la même vitesse, et, si au départ ils étaient l'un à côté de l'autre, ils resteront juxtaposés pendant toute la chute. Si maintenant on les réunit, de manière à en faire un parallélipipède rectangle R, chacune des moitiés de ce solide, sollicitée toujours par son propre poids, devra se mouvoir comme si elle était indépendante de l'autre moitié. De la résulte que le corps R, bien que son poids P soit double de chacun des poids p et p', se meut cependant avec la même vitesse que chacun des corps C et C' isolément.

Il n'est pas plus difficile de concevoir que des corps différents par leur nature prennent, dans le vide, des mouvements identiques.

par exemple, le système se met en mouvement ; mais, comme la seule action de la force p doit mettre en mouvement, en même temps, les deux poids fixés aux extrémités du fil, on conçoit que ce mouvement doit être plus lent que celui de la chute libre. — Nous allons l'étudier d'abord, et nous indiquerons ensuite comment il peut conduire aux lois de la chute libre.

Pour déterminer la loi suivant laquelle varient les *espaces* parcourus au bout des temps successifs, on emploie une règle verticale divisée, le long de laquelle descend le poids $P + p$. Il est maintenu au zéro de cette règle, jusqu'au moment où le battement d'une horloge jointe à l'appareil marque le commencement d'une seconde déterminée ; le poids est alors abandonné ; on cherche, par des tâtonnements, en quel point de la règle on doit placer une plaque horizontale B (*fig.* 26), fixée à un curseur mobile le long de la règle, pour qu'elle soit frappée par ce poids à l'instant où l'on entend le battement de l'horloge qui termine cette seconde. La mesure de la distance comprise entre le zéro et la position actuelle de la plaque donne l'espace e_1 parcouru au bout d'un seconde. — On détermine de la même manière, et en répétant les mêmes tâtonnements, les espaces e_2, e_3... parcourus en 2, 3... secondes (*fig.* 27 et 28). En comparant entre eux ces résultats, on trouve que les espaces e_1, e_2, e_3... sont entre eux comme les nombres 1, 4, 9..., c'est-à-dire *comme les carrés des temps*. — C'est ce qu'on nomme la *loi des espaces*, pour le mouvement du système actuel.

Si maintenant on se propose d'évaluer directement, avec l'appareil, les vitesses acquises par le système à divers instants du mouvement, on emploie un autre curseur, portant un anneau A (*fig.* 29), qui laissera passer le poids P sans le toucher, mais qui arrêtera le poids additionnel p dont la forme est allongée. On place d'abord l'anneau à la division e_1, de manière que le poids additionnel p soit enlevé au bout d'une seconde ; à partir de ce moment, le poids P continue à descendre d'un mouvement uniforme, avec la vitesse qu'il possédait au moment de la suppression du poids p (7, 2°). On cherche donc en quel point on doit placer la plaque B, pour qu'elle soit rencontrée une seconde après la suppression du poids p ; la distance des points A et B donne l'espace parcouru en une seconde, dans ce mouvement uniforme, c'est-à-dire la vitesse que le corps avait acquise en arrivant en A, et qu'il a conservée de A en B, soit v_1 cette vitesse. — On détermine de la même manière les vitesses v_2, v_3... acquises au bout de 2, 3... secondes de chute, en plaçant convenablement les deux curseurs (*fig.* 30). On trouve alors que les vitesses v_1, v_2, v_3 .. sont entre elles comme les nombres 1, 2, 3... c'est-à-dire *proportionelles au temps*. — C'est la *loi des vitesses* dans le mouvement actuel (*).

(*) Si, prenant les résultats numériques fournis par ces expériences, on compare la vitesse v_1 à l'espace parcouru e_1, on constate que v_1 est double de e_1.

Il en est d'ailleurs toujours ainsi dans un mouvement uniformément accéléré, et

42. Le mouvement des corps tombant en chute libre, dans le vide, est uniformément accéléré. — On vient d'obtenir deux lois expérimentales, dont une seule suffirait pour établir que le mouvement, dans la machine d'Atwood, est *uniformément accéléré* (5, *Remarque*). —

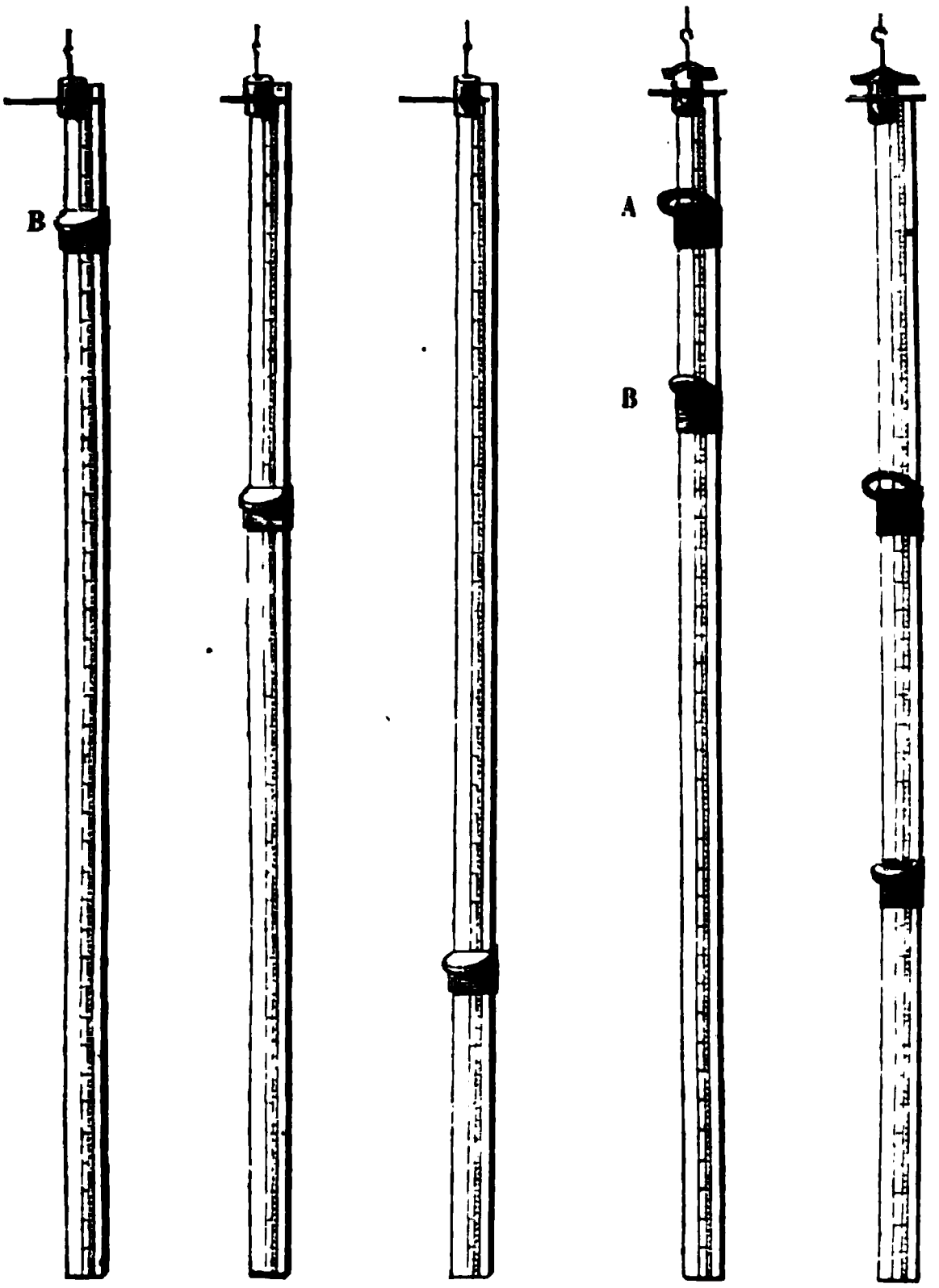


Fig. 26. Fig. 27. Fig. 28. Fig. 29. Fig. 30.

Il est facile d'en conclure que le mouvement d'un corps tombant en chute libre est de même nature.

En effet, désignons par γ l'accélération dans l'expérience qu'on vient

sans vitesse initiale. En effet, si l'on fait $t = 1$ dans les formules établies précédemment (5, *Remarque*), il vient

$$v_1 = \gamma, \qquad e_1 = \frac{\gamma}{2}$$

et par suite $v_1 = 2e_1$.

de faire : c'est une quantité constante, égale aux différences constantes $v_2, -v_1, v_3, -v_2, \ldots$ Cette accélération est produite par l'action de la force p sur tout le système suspendu aux deux extrémités du fil. Si ce même système tombait librement, il serait sollicité par la force $3P + p$; or, si l'on désigne par g l'accélération de ce mouvement, on aura, d'après ce qui a été vu précédemment (13) :

$$\frac{g}{\gamma} = \frac{2P + p}{p}$$

d'où l'on tire :

$$g = \gamma \frac{2P + p}{p}$$

Donc l'accélération g est constante, aussi bien que γ, seulement elle a une valeur beaucoup plus grande. — On voit ainsi que les lois de la chute libre sont les mêmes que celles du mouvement dans la machine d'Atwood : mais cette machine, en ralentissant le mouvement, permet de déterminer plus facilement ces lois.

Enfin, c'est à cause du ralentissement même du mouvement, dans la machine d'Atwood, que l'on peut considérer l'influence de la résistance de l'air comme négligeable.

43. **Détails de construction de la machine d'Atwood.** — La figure 31 représente la machine d'Atwood, telle qu'on l'emploie ordinairement pour les expériences de cours. Pour donner une grande mobilité à la poulie R, sur laquelle passe le fil qui supporte les poids, on fait reposer chacune des extrémités de l'axe de cette poulie sur les *jantes* croisées de deux roues (on voit sur la figure les deux roues r, r' en avant de R; les deux roues postérieures sont masquées en partie). Grâce à cette disposition, le mouvement de rotation rapide de la poulie R produit une rotation beaucoup plus lente des roues r, r',$r''r'''$, et ne détermine sur les jantes de ces roues qu'un frottement de roulement inappréciable; d'autre part, les axes de ces roues elles-mêmes n'éprouvent sur leurs supports que des frottements extrêmement faibles, à cause de la lenteur du glissement.

Une horloge H, dont le balancier M bat les secondes, et dont l'aiguille se meut sur un cadran divisé en 60 parties, sert à apprécier les durées des mouvements (*).

Des curseurs de formes diverses A, B, peuvent être fixés, comme il a été

(*) En général, l'appareil est disposé de façon que ce soit l'horloge elle-même qui détermine le départ de la masse surchargée, à l'instant précis où son aiguille arrive au zéro du cadran, c'est-à-dire à l'instant où l'horloge bat le commencement d'une seconde. La figure ci-contre montre un système de leviers coudés *abcde*, qui commande le support f par lequel le poids $P + p$ est maintenu au zéro de la règle : à l'instant où l'aiguille de l'horloge arrive au zéro, une disposition particulière met en mouvement ce système de leviers, le support f s'abaisse et le mouvement commence.

dit, le long de la règle divisée LL', au moyen de vis de pression, de manière à réaliser les diverses expériences qui ont été décrites

Fig. 51. — Machine d'Atwood.

44. Vérification expérimentale, au moyen de la machine d'Atwood, de la proportionnalité des forces aux accélérations qu'elles impriment à un même système. — On a établi théorique-

ment plus haut (15) que les forces sont entre elles comme les accélérations qu'elles impriment à un même système. Ce principe peut se vérifier expérimentalement à l'aide de la machine d'Atwood, de la manière suivante :

Plaçons, sur l'une des masses constantes P (*fig.* 25), cinq petites masses additionnelles, ayant chacune un poids p. La force qui déterminera le mouvement du système sera $5p$. Mesurons l'accélération γ, en prenant, par exemple, le double de l'espace parcouru au bout de la première seconde. (Note de la page 28.) — Transportons alors l'une des masses additionnelles à l'autre extrémité du fil ; le système à mettre en mouvement sera encore le même, mais la force productrice du mouvement sera $4p - p$, c'est-à-dire $3p$; déterminons encore, par l'expérience, l'accélération γ'. — On constatera, sur les valeurs numériques de γ et γ' ainsi obtenues, qu'on a

$$\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{5}{3} \quad \text{ou} \quad \frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{5p}{3p}$$

égalité qui vérifie précisément le principe énoncé.

On pourra répéter encore la vérification expérimentale en transportant de nouveau l'une des masses additionnelles, de la première extrémité du fil sur la seconde : si γ'' est l'accélération trouvée, on trouvera :

$$\frac{\gamma}{\gamma''} = 5$$

Il est d'ailleurs facile de multiplier les vérifications, en employant tel nombre de masses additionnelles que l'on voudra.

45. **Principe de l'appareil de M. Morin.** — Un cylindre vertical, couvert d'une feuille de papier, est animé d'un mouvement de rotation uniforme autour de son axe TT' (*fig.* 32). Au niveau de sa base supérieure, se trouve un corps pesant D, muni d'un crayon horizontal dont la pointe appuie légèrement sur le papier. — Si l'on vient à abandonner ce corps pendant que le cylindre est en mouvement, le crayon trace sur la feuille une courbe telle que CMNPB.

L'expérience étant faite, coupons la feuille de papier suivant la verticale CA qui passe par le point de départ C du crayon, et développons-la sur un plan (*fig.* 33); la droite CE, perpendiculaire à CA, n'est autre que le développement du cercle qui serait tracé par le crayon, supposé immobile, sur la surface du cylindre tournant. Menons maintenant des droites II', KK', LL'. .., parallèles à CA et équidistantes, et soit M, N, P..., les points où elles rencontrent la courbe. Lorsque, pendant l'expérience, le crayon s'est trouvé

Fig. 32.

en M, la génératrice I'I du cylindre avait pris, sous la verticale décrite par la pointe du crayon, la place de CA; de même, quand le crayon s'est trouvé en N, c'est la génératrice K'K qui avait pris la place de CA. Or, puisque le mouvement de rotation était uniforme, ces substitutions ont eu lieu à des intervalles de temps égaux, ou, en d'autres termes, les temps qu'il a fallu pour que le crayon arrivât aux points M, N, P... peuvent être considérés comme mesurés par les distances CI', CK', CL'; c'est-à-dire qu'ils sont entre eux comme les nombres 1, 2, 3... D'autre part, les espaces décrits verticalement par le crayon, à ces mêmes instants sont I'M, K'N, L'P... Or, en mesurant ces longueurs sur la feuille, on constate qu'elles sont entre elles comme les nombres 1, 4, 9,..., c'est-à-dire comme les carrés des temps correspondants 1, 2, 3...

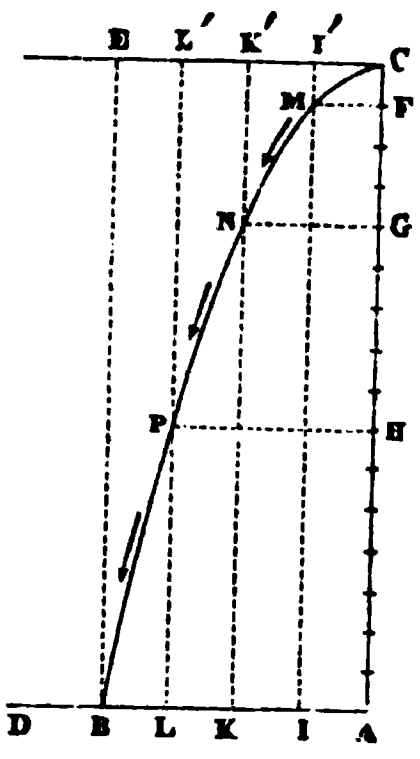


Fig. 33.

Donc *les espaces parcourus en chute libre sont proportionnels aux carrés des temps* : cette loi suffit pour caractériser un mouvement *uniformément accéléré* (5, *Remarque*).

46. Détails de construction de l'appareil de M. Morin. — Les conditions que l'on vient de supposer remplies sont réalisées de la manière suivante.

Le corps pesant dont on doit étudier le mouvement est une petite masse de fonte D (*fig.* 34), de forme cylindro-conique : la densité de la fonte étant très-grande, la perte de poids que ce corps éprouve n'a qu'une valeur relative peu considérable, et sa forme particulière lui permet de fendre plus facilement l'air pendant le mouvement. Il porte un petit crayon qui vient s'appuyer sur le cylindre tournant SS, et, pour que ce frottement ne le fasse pas dévier de la verticale, on y a ménagé deux petits appendices munis de trous, dans lesquels passent deux fils métalliques verticaux *ff'*, *gg'*, servant de guides. — Le crochet *a*, engagé d'abord dans le crochet *b*, sert à maintenir le corps D immobile, à la partie supérieure de sa course, jusqu'au moment où il sera abandonné à lui-même, sous l'action de la pesanteur.

Pour faire une expérience, on règle d'abord la verticalité de l'axe du cylindre, au moyen des vis calantes V, V, V : puis, au moyen de la manivelle *h*, on enroule sur le tambour U la corde qui soutient le poids R. Lorsqu'on vient ensuite à l'abandonner, le système se met en mouvement en sens contraire, sous l'action du poids R lui-même : ce mouvement est transmis, par une roue dentée, à une vis sans fin *v*, placée sur l'axe du cylindre SS, en sorte que ce cylindre lui-même est mis en mouvement. Ce mouvement tendrait à s'accélérer sans cesse ; mais les ailettes *l*, *l* étant entraînées en même temps et rencontrant dans l'air une résistance pro-

portionnelle au carré de la vitesse, il arrive bientôt un moment où la vitesse devient sensiblement constante : ce moment est généralement atteint

Fig. 34. — Appareil de M. Morin.

quand le poids moteur R a effectué les deux tiers de sa descente. — C'est alors que, en tirant sur le cordon *cd*, on dégage le crochet *b;* la masse D se met en mouvement, et le crayon trace sur la feuille de papier la courbe qui donne la loi de la chute.

47. Les expériences précédentes ne peuvent suffire pour déterminer avec précision l'intensité de la pesanteur. — On a vu

précédemment (42) qu'en désignant par γ l'accélération obtenue dans une expérience faite avec la machine d'Atwood, et par g l'accélération de la chute libre on a

$$g=\gamma\frac{2P+p}{p},$$

donc, théoriquement, pour déterminer g il suffirait de mesurer γ et de multiplier la valeur trouvée par le rapport connu $\frac{2P+p}{p}$. Mais, en réalité, les erreurs commises dans la mesure d'un espace si petit et d'un temps si court, et aussi l'influence des frottements qu'il est impossible de faire disparaître, enlèvent à cette méthode toute précision; la machine d'Atwood ne peut donc servir à déterminer la valeur numérique de g.

Quant à l'appareil de M. Morin, supposons que l'on mesure les distances CI′ CK′, CL′... (*fig.* 33) à l'aide d'une unité égale à la grandeur de l'arc parcouru par un point du cylindre en une seconde : l'une de ces mesures, celle de CL′ par exemple, fera connaître le temps écoulé depuis le commencement de la chute du corps D jusqu'à l'instant où il est arrivé en P : d'autre part, la mesure de L′P, en mètres, donnera l'espace parcouru; donc, théoriquement, dans l'équation

$$e=\frac{g}{2}t^2,$$

on connaîtra un système de valeurs numériques correspondantes de e et t, en sorte qu'on pourrait calculer g.—Cette méthode, qui exige la connaissance exacte de la vitesse de rotation du cylindre, présente, comme il sera facile de le voir, des difficultés pratiques dans la détermination de chacun des éléments de la formule précédente, lesquelles entraîneraient des erreurs considérables. Elle ne peut donc pas être non plus considérée comme propre à déterminer g.

Cette détermination de l'accélération g de la chute libre, qui sert de mesure à l'intensité de la pesanteur, s'effectue, comme on va l'indiquer, à l'aide du pendule.

II. PENDULE.

48. **Pendule simple.** — Le pendule idéal, pratiquement irréalisable, que l'on désigne sous le nom de *pendule simple*, se compose d'un point matériel A (*fig.* 35), suspendu à l'extrémité d'un fil sans poids, parfaitement flexible et inextensible : ce fil est assujetti à un point fixe par son autre extrémité B. Un pareil système est en équilibre, quand le fil est vertical. Si on l'écarte de cette position, pour l'amener dans la position BA (*fig.*36) et qu'on l'abandonne ensuite à lui-même, l'équilibre n'existe plus ; le

poids p de la sphère peut, en effet, se décomposer alors en deux forces, l'une r dirigée suivant le prolongement du fil et qui n'a d'autre *effet* que de le tendre; l'autre s perpendiculaire à cette direction et qui sollicite la sphère à revenir vers sa position d'équilibre; comme il en est de même tant que la sphère est à gauche du point ℓ, celle-ci parcourt, avec une vitesse croissante, l'arc AC décrit du point B comme centre avec BA comme *rayon*. Arrivé en C, le corps dépasse sa position d'équilibre, en vertu de sa vitesse acquise, et s'élève sur l'arc CA'. Mais la composante tangentielle du poids, agissant maintenant en sens contraire du mouvement, diminue peu à peu la vitesse et *finit* par l'anéantir. A ce moment le pendule, parvenu en BA', a accompli une *oscillation*. — La pesanteur continuant d'agir sur le corps, il redescend l'arc A'C, remonte de l'autre côté du point C jusqu'à ce que sa vitesse soit de nouveau réduite à zéro, puis revient sur lui-même et accomplit ainsi une série d'oscillations, alternativement dans un sens et dans l'autre. — On nomme *amplitude* d'une oscillation l'angle ABA' formé par les deux positions extrêmes du fil.

Fig. 35. Fig. 36.

49. **Durée des oscillations du pendule simple.** — La théorie montre qu'un pendule simple, formé comme il vient d'être dit, et partant d'une position BA, doit arriver de l'autre côté de la verticale jusqu'à la position symétrique BA'; il en résulte que, partant ensuite de BA', il doit revenir en BA, et ainsi de suite; en d'autres termes, ses oscillations doivent conserver indéfiniment *la même amplitude*, et par suite *la même durée*.

En soumettant la question au calcul, et considérant seulement le cas où *l'amplitude des oscillations est très-petite*, on trouve que la durée constante d'une oscillation est donnée par la formule

$$(1) \qquad t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

dans laquelle t désigne la durée de l'oscillation, exprimée en secondes; π est le rapport de la circonférence au diamètre, égal à 3,1416 environ; l est la longueur du pendule; g est l'accélération du mouvement vertical que prennent, sous l'influence de la pesanteur, les corps que l'on aban-

donne librement à eux-mêmes dans le vide, au lieu même où se font les expériences. Ces deux quantité l et g doivent toujours être exprimées au moyen d'une même unité de longueur.

50. Pendule composé. — Les pendules que nous pouvons réaliser sont toujours formés de plusieurs points matériels, assujettis à osciller en restant chacun à une distance constante d'un point fixe. Un pareil système prend le nom de *pendule composé*, et la théorie montre que la formule du pendule simple lui serait appliquable, s'il oscillait dans le vide, et qu'il n'y eût aucune résistance développée au point de suspension: on doit alors, dans cette formule, prendre pour valeur de l la longueur du pendule simple qui ferait son oscillation dans le même temps, longueur que le calcul permet d'ailleurs de déterminer *a priori*, lorsque le pendule composé présente une forme suffisamment simple.

Lorsque le pendule est formé d'une sphère pesante, suspendue à l'extrémité d'un fil très-flexible, et lorsque le poids du fil est négligeable par rapport à celui de la sphère, on démontre qu'on peut prendre pour valeur de l la distance du centre de la sphère au point de suspension du fil. — On peut donc, en adoptant cette dernière disposition, soumettre à l'expérience la formule du pendule.

51. Isochronisme des petites oscillations. — Les pendules que l'on fait osciller éprouvent, de la part de l'air, une résistance qui tend à diminuer la vitesse; les résistances qui se développent au point de suspension ont un effet semblable. Aussi, les amplitudes des oscillations vont-elles en diminuant peu à peu, jusqu'à devenir insensibles. Mais si l'on considère seulement les oscillations d'amplitude très-petite, le calcul indique que *leur durée doit rester la même, quelque décroissance qu'éprouve l'amplitude.* — Cette loi, découverte par Galilée en observant les mouvements d'une lampe suspendue à la voûte de la cathédrale de Pise, peut s'énoncer en disant que les oscillations très-petites restent *isochrones*.

Pour vérifier expérimentalement cette loi, on fera osciller un pendule, et, quand les oscillations seront devenues suffisamment petites, on déterminera, à l'aide d'une montre à secondes, la durée de 100 oscillations; puis la durée des 100 oscillations suivantes, et ainsi de suite. Le résultat obtenu restera sensiblement constant.

52. Vérifications expérimentales des diverses conséquences de la formule du pendule. — 1° La formule (1) ne contient aucune quantité qui caractérise le poids ou la nature de la sphère suspendue à l'extrémité du fil qui la supporte. Donc, si l'on construit des pendules de même longueur avec des sphères de plomb, de cuivre, de fer, d'ivoire, etc., et qu'on les fasse osciller dans un même lieu, on doit trouver, en employant la méthode précédente, que la durée d'une oscillation est la même pour tous ces pendules : c'est en effet ce que montre l'expérience. — Ce résultat peut être considéré comme démontrant que l'accélération g im-

primée par la pesanteur à *divers corps*, en un même lieu, est la même c'est ce qui avait d'ailleurs été établi déjà par une autre expérience (59

2° La même formule conduit à cette autre conséquence, que, *dans u même lieu, les durées des oscillations très-petites de deux pendules de longueur différentes sont proportionelles aux racines carrées des longueurs.* — Considérons, en effet, un second pendule de longueur l', et désignons par t' la durée d'une de ses oscillations ; on aura, comme pour le premier.

$$t' = \pi\sqrt{\frac{l'}{g}}, \tag{2}$$

g ayant la même valeur, puisque les oscillations s'exécutent dans le même lieu. En divisant membre à membre les égalités (1) et (2), il vient :

$$\frac{t}{t'} = \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{l'}},$$

ce qui démontre la proposition énoncée. — On vérifie ce résultat, par l'expérience, au moyen de deux pendules, dont le premier a une longueur égale à 4 fois celle du second ; on trouve que 100 oscillations du premier durent deux fois autant que 100 oscillations du second.

3° Enfin, si l'on élève au carré les deux membres de la formule (1), on en peut tirer la valeur de g, savoir :

$$g = \frac{\pi^2 l}{t^2}.$$

On voit donc que, pour trouver la valeur de l'accélération due à la pesanteur, en un lieu déterminé, il suffit de déterminer, dans ce lieu, la durée t de l'oscillation d'un pendule dont on connaît exactement la longueur l.

Si l'on transporte le même pendule dans un autre lieu, et qu'on y détermine la durée t' de l'oscillation, on aura :

$$g' = \frac{\pi^2 l}{t'^2},$$

g' désignant l'accélération due à la pesanteur dans la deuxième station. De ces deux égalités, on déduit :

$$\frac{g}{g'} = \frac{t'^2}{t^2};$$

c'est-à-dire que, *en deux lieux différents du globe, les accélérations dues à la pesanteur sont inversement proportionelles aux carrés des durées des oscillations d'un même pendule.*

53. **Détermination des valeurs de l'intensité de la pesanteur.** — C'est sur les considérations précédentes qu'est fondée la méthode

mployée pour déterminer, d'une manière précise, les valeurs de l'intensité de la pesanteur aux divers points du globe.

On détermine avec précision, d'une part, la *longueur l* d'un pendule composé convenablement choisi (50), d'autre part, la *durée t* de son oscillation, et l'on en déduit la valeur de *g*, au lieu même où est faite l'expérience : il suffira pour cela d'appliquer, soit la formule (1), soit une autre formule plus approchée, dans laquelle intervient la valeur de l'amplitude de l'oscillation. C'est ce qui a été fait, à Paris, par Borda.

Cette valeur une fois déterminée, il suffit de faire osciller *un même pendule*, quelconque d'ailleurs, en diverses stations suffisamment éloignées les unes des autres, pour constater que les durées t, t', t''... de l'oscillation sont en général différentes ; on en conclut que les valeurs g, g', g''... de l'accélération due à la pesanteur sont différentes. D'autre part, les valeurs de g, g', g''... étant inversement proportionelles aux carrés des durées de l'oscillation, ces observations suffisent pour déterminer les rapports de toutes ces valeurs à l'une d'entre elles, par exemple les rapports de toutes les accélérations à celle qui est particulière à la station de Paris, et que les expériences de Borda ont déterminée.

Enfin, si l'on remarque que les accélérations produites par la pesanteur sur un corps sont proportionnelles aux forces développées par l'action qu'elle exerce sur lui, on voit que les valeurs de g peuvent être considérées comme mesurant l'*intensité de la pesanteur* aux divers points de la terre.

54. Variation de l'intensité de la pesanteur aux divers points du globe. — Les mesures effectuées au moyen du pendule ont montré que l'intensité de la pesanteur augmente lorsqu'on s'éloigne de l'équateur terrestre pour se rapprocher des pôles : cette augmentation est déterminée principalement par l'aplatissement de la terre vers ses pôles ; mais elle est aussi due, en partie, au mouvement de rotation de la terre autour de son axe.

D'après les mesures de Borda et des savants contemporains, la valeur de g est :

A L'ÉQUATEUR.	A PARIS.	A LA LATITUDE DE 80°.
9m,7800	9m,8088	9m,8293 .

On a constaté également, à l'aide du pendule, qu'à latitude égale l'intensité de la pesanteur diminue à mesure qu'on s'élève dans l'amosphère ; elle est plus grande au niveau de la mer que sur les continents élevés ou sur le sommet des montagnes.

III. — BALANCE.

55. Comparaison des poids des corps en un même lieu ; poids relatifs. — On compare généralement les actions que la pesanteur exerce

sur les corps, à celle qu'elle exerce dans le même lieu sur un corps déterminé, dont on prend le poids pour unité. On choisit en France le *gramme*, c'est-à-dire le poids d'un centimètre cube d'eau distillée, prise à la température du maximum de densité. — Le nombre de grammes et de fractions de gramme équivalent au poids d'un corps est ce que nous nommerons son *poids relatif;* c'est là, du reste, ce qu'on entend, dans le langage vulgaire, par le mot *poids*.

Il est important de remarquer que *le poids relatif d'un corps est un nombre constant pour tous les points du globe.*— Concevons, en effet, qu'un bloc de cuivre produise sur le dynamomètre, à Paris, la même flexion que 500 grammes ; on peut le considérer comme formé de 500 parties égales, dont chacune aurait un poids relatif de 1 gramme. Le même corps, transporté à l'équateur, produira sur le même dynamomètre une flexion différente de la première, mais ce sera celle que produiraient 500 grammes à l'équateur, puisque l'intensité de l'action exercée par la pesanteur sur chacune des 500 parties du bloc aura diminué comme pour le gramme lui-même. Son poids relatif sera donc toujours de 500 grammes, en quelque lieu de la terre qu'on le place.

56. **Balance.** — La balance est un instrument destiné à déterminer *le poids relatif* des corps, c'est-à-dire le nombre de grammes, entier ou fractionnaire, qui équivaut à ce poids.

Elle se compose essentiellement d'une barre rigide ou *fléau* AB (*fig.* 37),

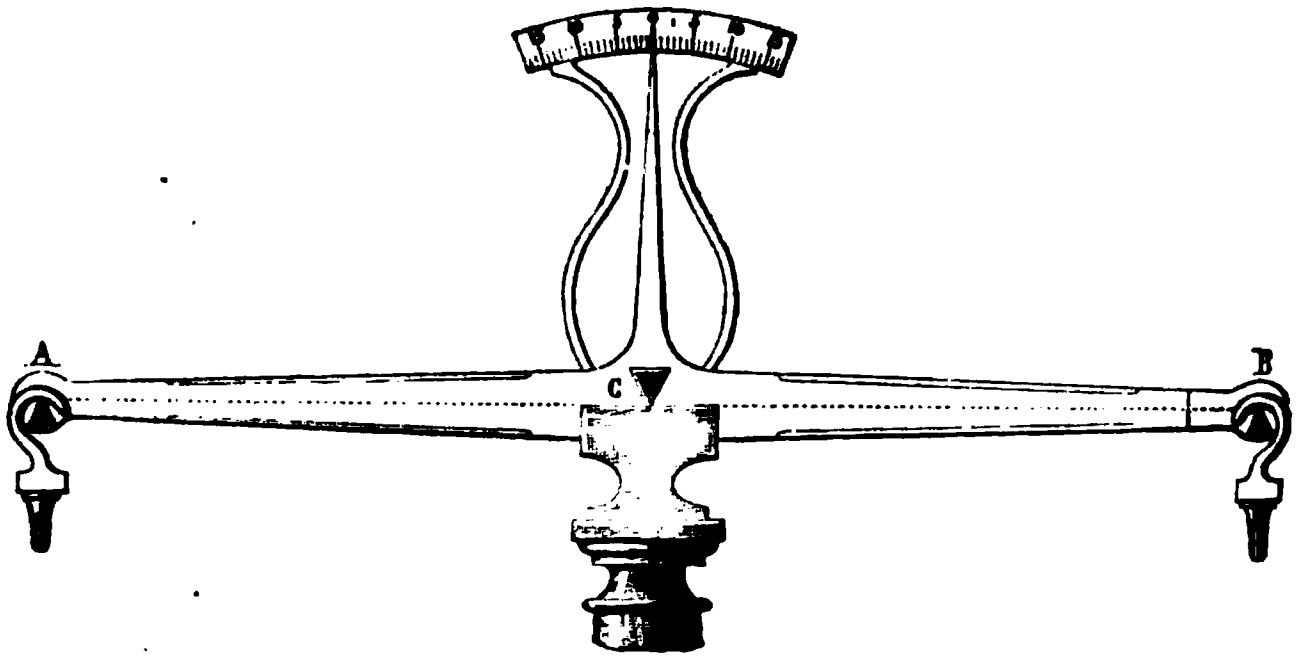


Fig. 37.

traversée, en son milieu C, par un couteau d'acier trempé, qui fait saillie des deux côtés : l'arête inférieure de ce couteau repose, de part et d'autre, sur deux petits plans d'acier trempé ou d'agate, situés l'un avant, l'autre en arrière du fléau, et dans un même plan horizontal ; le fléau peut ainsi osciller librement autour de cette arête. Il soutient, à chacune de ses extrémités, un plateau destiné à recevoir les corps ou les poids marqués ; pour cela, ces deux extrémités portent deux couteaux, A, B,

tournant en haut leurs arêtes, sur lesquelles s'appuient les crochets qui supportent les plateaux. Les arêtes des trois couteaux, A, B, C, sont parallèles et situées dans un même plan ; pour simplifier le langage, dans tout ce qui va suivre, nous les supposerons réduites à trois points situés en ligne droite, et nous nommerons *ligne du fléau* la droite qui joint ces points ; nous appellerons *bras du fléau* les distances AC, BC, des couteaux extrêmes au couteau médian.

Perpendiculairement à la ligne du fléau et sur son milieu, est fixée une aiguille, dont l'extrémité peut parcourir un petit arc de cercle gradué ; le zéro de la graduation correspond à la position verticale de l'aiguille, et par suite à la position horizontale du fléau.

57. **Justesse et sensibilité de la balance.** — Pour *faire une pesée*, c'est-à-dire pour déterminer le poids d'un corps, la méthode la plus simple consiste à placer ce corps dans l'un des plateaux, et des poids marqués dans l'autre plateau, jusqu'à ce que le fléau se tienne en équilibre dans la position horizontale. On fait la somme des poids marqués, et l'on considère cette somme comme exprimant le poids du corps lui-même.

Mais, pour qu'on puisse compter sur l'exactitude de ce résultat, il faut à la fois : que la balance soit *juste*, c'est-à-dire que le fléau se tienne horizontal sous la charge de poids égaux placés dans les deux plateaux ; et qu'elle soit *sensible*, c'est-à-dire que l'addition d'un poids très-petit, d'un côté ou de l'autre, dérange le fléau de sa position. — Chacune de ces qualités correspond à des conditions spéciales de construction, qu'on doit chercher à réaliser en fabriquant la balance.

58. **Conditions géométriques de justesse.** — La balance est dite *juste*, ainsi qu'on vient de l'indiquer, lorsque le fléau se tient horizontal sous la charge de poids égaux placés dans chacun de ses plateaux.

Une balance est juste lorsqu'elle satisfait à la fois aux deux conditions géométriques suivantes :

1° *Que le centre de gravité de la partie mobile (fléau et plateaux) soit sur une perpendiculaire à la ligne du fléau passant par le point de suspension.*

2° *Que les deux bras du fléau soient d'égale longueur.*

En effet, soit AB (*fig.* 38) la ligne du fléau et C le point de suspension : supposons que le centre de gravité G de la partie mobile soit sur la perpendiculaire menée à AB par le point C. Si le fléau est placé horizontalement, et que les plateaux soient vides, le centre de gravité G du système sera dans la verticale du point de suspension ; il y aura donc équilibre (57) et le poids M de la partie mobile n'aura d'autre effet que

Fig. 38.

d'appuyer l'axe sur ses supports. On voit même, que si le centre de gravité G est *au-dessous de l'axe* C, comme le suppose la figure, l'équilibre sera stable ; car, si le fléau est écarté en A'B', le poids M de la partie mobile tendra à ramener le point G' en G, dans la verticale du point C et au-dessous de ce point. — Donc, si la première des conditions énoncées est remplie, lorsque les plateaux sont vides, le fléau placé horizontalement se tient en équilibre ; si, en outre, le centre de gravité est au-dessous de l'axe de suspension, cet équilibre est stable.

Supposons maintenant, en outre, que les longueurs des deux bras soient égales, et plaçons dans les deux plateaux des poids égaux : ils agiront aux extrémités A et B comme deux forces verticales P, P (*fig.* 39), égales et parallèles, et leur résultante sera une force égale à leur somme, et passant par le milieu de AB, c'est-à-dire par le point C lui-même ; elle pourra donc être considérée comme appliquée en C, et n'aura d'autre effet que de produire une pression de l'axe sur ses supports ; donc le fléau restera horizontal. On voit même que, si le point G est placé au-dessous de l'axe C, le fléau écarté en A'B' sera encore ramené à la position AB par le poids M de la partie mobile. — Donc, si la seconde condition énoncée est remplie en même temps que la première, le fléau placé horizontalement reste en équilibre sous la charge de poids égaux ; cet équilibre est stable si le centre de gravité est au-dessous de l'axe de suspension.

Fig. 39.

Il nous reste à dire quelques mots du cas où, toutes les conditions de justesse étant remplies, le centre de gravité ne serait pas au-dessous de l'axe de suspension. — Si le centre de gravité était *sur l'axe lui-même*, les plateaux étant vides ou chargés de poids égaux, le fléau placé horizontalement serait en équilibre ; mais s'il était amené dans une autre position, il y demeurerait encore : il serait donc dans un état d'équilibre indifférent (37). — Enfin, si le centre de gravité était *au-dessus de l'axe*, la balance, vide ou chargée de poids égaux, serait en équilibre lorsque la ligne du fléau serait horizontale ; mais cet équilibre serait instable, et l'instrument se renverserait dès qu'on viendrait à l'écarter de cette position. Une semblable balance est dite *folle*. — Donc, pour qu'une balance juste soit d'un usage commode, il faut que le centre de gravité de la partie mobile soit *au-dessous de l'axe de suspension*, seul cas où la position horizontale du fléau constitue une position d'équilibre stable.

59. **Réalisation pratique des conditions de justesse.** — Pour réaliser les conditions de justesse, le constructeur cherche toujours à faire le fléau et les plateaux aussi symétriques que possible, quant au poids et

aux dimensions de leurs diverses parties. C'est pour conserver l'égalité des bras dans toutes les positions de l'instrument, qu'on prend, pour l'axe de suspension du fléau et pour les supports des crochets, des arêtes vives : les points de contact restent ainsi toujours les mêmes, quelle que soit l'inclinaison du fléau.

60. **Constatation expérimentale de la justesse.** — La balance une fois construite, on peut vérifier si elle est juste, sans qu'il soit nécessaire d'avoir des poids dont l'égalité ait été préalablement constatée. Pour cela, on fera les deux opérations suivantes :

1° On abandonnera la balance à elle-même, les plateaux étant vides. Si le fléau s'arrête dans la position horizontale, la première condition de justesse est remplie, et le centre de gravité est convenablement situé. — S'il n'en était pas ainsi, on pourrait aisément corriger le défaut de l'instrument en ajoutant, *une fois pour toutes*, une charge suffisante du côté qui semble trop léger.

2° Pour vérifier l'égalité des deux bras, on placera un corps quelconque dans l'un des plateaux, et l'on ajoutera de la grenaille de plomb ou du sable dans l'autre plateau, jusqu'à ce que l'aiguille s'arrête au zéro ; l'équilibre étant établi, on transportera dans le plateau de droite la charge qui était à gauche, et dans le plateau de gauche celle qui était à droite : si l'aiguille revient encore au zéro, on peut affirmer que les bras sont égaux. En effet, si l'un d'eux AC avait été plus petit que l'autre, on aurait été conduit à mettre d'abord du côté A une charge plus grande que du côté B ; donc, en intervertissant les charges sans les modifier, on aurait placé la plus petite en A, c'est-à-dire à l'extrémité du bras le plus court, et l'équilibre aurait été détruit. — Donc, si le fléau reste horizontal, les bras sont égaux, et la balance est définitivement juste.

61. **Conditions géométriques de sensibilité.** — On cherche ordinairement à donner à la balance une sensibilité *constante*, c'est-à-dire à faire que, l'équilibre étant établi, l'addition d'une surcharge déterminée dans l'un des plateaux fasse toujours incliner le fléau d'un même angle, quelle que soit la valeur absolue de la charge primitive. Pour qu'il en soit ainsi, la condition géométrique est *que les trois couteaux soient en ligne droite*.

Si l'on veut maintenant que la sensibilité soit *aussi grande que possible*, c'est-à-dire que, l'équilibre étant établi, une surcharge déterminée produise une inclinaison du fléau aussi grande que possible, il faut *que les bras soient aussi longs que possible, que la balance soit aussi légère que possible, et que son centre de gravité soit aussi voisin que possible de l'axe de suspension*.

En effet, supposons les trois points A, C, B (*fig.* 40), situés en ligne droite, et les plateaux chargés d'abord de poids P et P′ tels que le fléau placé horizontalement soit en équilibre, c'est-à-dire que la résultante des poids P et P′ passe par le point de suspension C, et n'ait pour effet que

d'appuyer le couteau sur ses supports. Si l'on vient à ajouter dans l'un des plateaux, dans celui de gauche par exemple, un poids p, ce poids tendra seul à incliner la balance : le fléau viendra alors dans une position A'B' telle, que la force p appliquée en A' fasse équilibre à la force M appliquée en G', ou, en d'autres termes, que la résultante de ces deux forces passe par le point C. Par conséquent, l'inclinaison sera toujours la même pour une même valeur de p, quels que soient les poids P et P' qui constituaient la charge primitive.

Fig. 40.

On conçoit d'ailleurs que, pour une même surcharge p, l'inclinaison doit être d'autant plus grande que la distance CA' est plus grande, le poids M plus petit, et la distance CG' plus petite (*).

(*) On peut se rendre compte de ces résultats, d'une manière plus précise, en évaluant l'angle dont s'incline le fléau, lorsque ses trois couteaux sont en ligne droite.

Supposons les deux forces p et M appliquées respectivement aux deux points I et H où leurs directions prolongées vont rencontrer la direction AB, ces deux points étant supposés liés invariablement au fléau (16) ; pour que le fléau reste en équilibre dans la position A'B', il suffit que la résultante des deux forces parallèles p et M passe par le point C, condition qui sera remplie (18,1°) si l'on a :

$$\frac{CH}{CI} = \frac{p}{M};$$

soit l la longueur du bras A'C, d la distance CG' du centre de gravité au point de suspension, et α l'angle dont le fléau s'est incliné ; les triangles rectangles A'IC et G'HC donnent :

$$CH = d \sin \alpha \quad \text{et} \quad CI = l \cos \alpha ;$$

en substituant ces valeurs dans la relation précédente, on a :

$$\frac{d \sin \alpha}{l \cos \alpha} = \frac{p}{M};$$

d'où

$$\operatorname{tang} \alpha = \frac{pl}{Md}.$$

On voit que la tangente de l'angle α, pour une même valeur de la surcharge p, est *proportionnelle à la longueur l* du bras du fléau, *en raison inverse du poids* M de la

62. **Réalisation pratique des conditions de sensibilité.** — De ce que nous venons de dire, il résulte que, pour rendre une balance très-sensible, le constructeur doit chercher à faire le fléau très-long et très-léger, et cependant assez rigide pour que, la balance étant chargée, la ligne du fléau reste toujours droite. — Ces conditions sont difficiles à concilier; cependant on peut allier, jusqu'à un certain point, la légèreté à la rigidité, en taillant le fléau en forme de losange, dans une règle plate de bronze ou d'acier, et en évidant une grande partie de son intérieur; c'est ce qui a été fait pour le fléau de la balance représentée par la figure 41. — On appelle *limite de charge* de chaque balance le poids le plus grand qu'on puisse lui faire porter, sans faire fléchir sensiblement le fléau.

Enfin, on dit qu'une balance est sensible au *milligramme* ou au *centigramme*, selon qu'il suffit d'une surcharge d'un milligramme ou d'un centigramme pour faire incliner le fléau d'un angle appréciable.

Pour les besoins de la pratique, on construit des balances de dimensions très-diverses, en rapport avec la nature des pesées qu'elles doivent effectuer. — Les unes sont destinées aux corps très-légers : elles ont un fléau très-léger et très-faible, et peuvent être facilement rendues sensibles au demi-milligramme.— D'autres, au contraire, sont destinées aux corps plus pesants : elles ont un fléau plus lourd et plus résistant, et peuvent supporter, sans fléchir, des poids assez considérables. Ces dernières sont tout au plus sensibles au centigramme : mais une erreur de quelques centigrammes sur un poids de plusieurs kilogrammes a peu d'importance, en sorte que la *sensibilité relative* de ces balances peut être tout à fait comparable à celle des balances les plus délicates, à la condition qu'on les emploie à évaluer des poids assez considérables.

63. **Conservation de la balance.** — Les balances précises offrent quelques détails de construction destinés à assurer et à conserver la sensibilité. L'instrument représenté par la figure 41 est l'un des modèles les plus satisfaisants.

La balance est supportée par une colonne de fonte MN, établie sur une boîte reposant sur des vis calantes; la colonne porte à sa partie supérieure un support horizontal C, qui vient (en traversant une large ouverture pratiquée dans le fléau) recevoir le couteau sur un plan d'agate. Le fléau a la forme d'un losange évidé, et porte à ses deux extrémités des couteaux d'acier trempé, sur lesquels s'appuient, par des plans d'agate,

balance, *et en raison inverse de la distance* d *de son centre de gravité à l'axe de suspension*.

Enfin, dans la pratique, l'inclinaison α étant toujours très-petite, on peut prendre l'angle lui-même pour sa tangente ; on voit alors que, pour une même balance, les quantités l, M et d étant constantes, les valeurs de l'inclinaison « sont proportionnelles aux valeurs de la surcharge p. On peut donc, connaissant l'inclinaison que donne à une balance une surcharge connue, apprécier immédiatement, dans chaque cas particulier, ce qu'il faut ajouter ou retrancher dans le plateau pour arriver à l'équilibre : les tâtonnements inévitables dans les pesées sont ainsi beaucoup abrégés.

des étriers E, E′, destinés à soutenir les plateaux (*fig.* 41 et 42). Une pièce de fonte FF′, qu'on nomme la *fourchette*, peut s'élever ou s'abaisser à volonté, au moyen d'un système de leviers qui est contenu dans la colonne MN et qu'on met en mouvement par la rotation du bouton G placé hors de la cage de verre; lorsque, en tournant ce bouton dans un sens, on fait monter la fourchette, elle saisit d'abord par ses extrémités les étriers E, E′, qu'elle soulève un peu au-dessus de leurs couteaux; puis,

Fig. 1. — Balance de précision.

par les deux appendices H, H′ qu'elle présente, elle soulève le fléau lui-même, de façon que le couteau du milieu ne repose plus sur le plan C; grâce à cette disposition, aucun des trois couteaux ne peut être émoussé par les frottements, quand la balance n'est pas en expérience. Quand on veut faire une pesée, on fait descendre la fourchette en tournant le bouton G en sens contraire; elle replace alors successivement le fléau sur le

plan C, puis les étriers sur leurs couteaux, et la balance oscille librement (*).

Les oscillations du fléau étant accusées par les mouvements de l'aiguille sur son cadran, elles sont d'autant plus faciles à apprécier que le rayon du cercle est plus grand, c'est-à-dire que l'aiguille est plus longue. Or, si l'aiguille restait placée au-dessus du fléau comme dans la figure 37, on ne pourrait en accroître la longueur sans augmenter la hauteur de l'instrument; les balances de précision portent une aiguille *ab*, placée au-dessous du fléau, et dont la longueur est presque égale à celle de la colonne métallique (*fig.* 41); l'extrémité de cette aiguille se meut sur un petit cadran d'ivoire divisé, placé sur le pied de l'instrument.

La balance est entourée d'une cage de verre, qui la préserve des mouvements dus aux courants d'air. Pour éviter l'oxydation des pièces d'acier, on dessèche l'air intérieur de la cage en y plaçant un vase V qui contient, soit de la chaux vive, soit de l'acide sulfurique. — Un thermomètre T donne les températures auxquelles sont faites les pesées.

Enfin, la sensibilité dépendant de la distance du centre de gravité à l'axe de suspension du fléau (61), on fait en sorte de pouvoir à volonté déplacer un peu ce centre de gravité. Pour cela, on fixe au-dessus du fléau et en son milieu une tige verticale sur laquelle on peut faire monter ou descendre, au moyen d'un pas de vis, une petite masse pesante. Cette petite masse consiste, soit en une virole mécanique, comme on le voit dans un grand nombre de balances, soit mieux encore en une tige horizontale portant à ses deux extrémités de petites boules massives, comme le montre la figure 41.

64. **Double pesée.** — La méthode de la *double pesée*, imaginée par Borda, permet de faire une pesée exacte, même avec une balance qui n'est pas juste, pourvu que cette balance soit sensible. Voici en quoi consiste cette méthode :

Le corps à peser étant placé dans l'un des plateaux, on lui fait équilibre au moyen d'une *tare* placée dans l'autre, c'est-à-dire au moyen d'une

(*) On voit (*fig.* 42) que le premier étrier E en suppporte un second *e*, mobile sur lui autour d'un axe qui passe par les pointes des deux vis V', V'' : les mouvements de ces deux étriers, qui s'effectuent respectivement autour de deux axes horizontaux, perpendiculaires entre eux, permettent à la tige T de prendre une position quelconque dans l'espace; les plateaux obéissent donc librement à l'action de la pesanteur, en quelque point de leur surface qu'on ait placé les poids. Cette dernière condition n'est pas toujours réalisée, à beaucoup près, dans toutes les balances de précision; elle a cependant une influence sensible sur l'exactitude des pesées.

quantité de grenaille de plomb ou de sable qu'on règle de façon que l'aiguille vienne s'arrêter au zéro de la graduation. On enlève ensuite le corps, et l'on met à sa place, *dans le même plateau*, des poids marqués jusqu'à ce que l'aiguille revienne au zéro. La somme de ces poids représente exactement le poids du corps, puisque le corps et les poids font équilibre à la tare dans des conditions absolument identiques.

Cette méthode ne suppose évidemment en rien que la balance soit juste; il suffit qu'elle soit sensible. Or, les conditions de justesse étant très-difficiles à réaliser, on suppose toujours qu'elles ne le sont pas, même pour les balances les mieux construites, quand on en veut faire usage pour une détermination précise : c'est donc toujours à la méthode de la double pesée qu'on a recours en pareil cas.

65. **Balance hydrostatique.** — On nomme *balance hydrostatique* une balance (*fig.* 43) disposée de manière à faciliter les expériences dans lesquelles les corps à peser doivent être plongés dans des liquides.

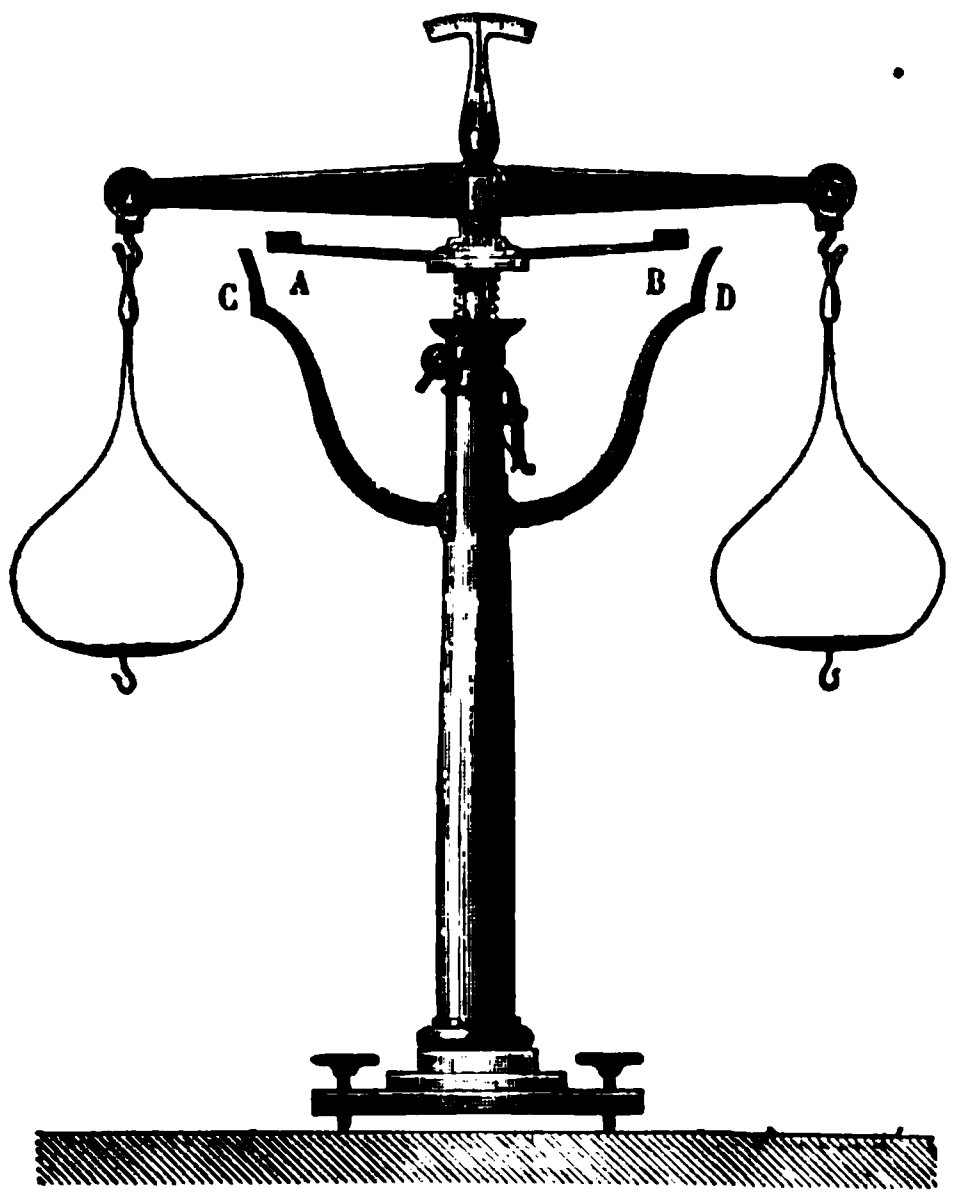


Fig. 43. — Balance hydrostatique.

Sous les plateaux sont placés des crochets, auxquels on peut suspendre les corps. La colonne est creuse et contient une crémaillère, au moyen de laquelle on peut élever d'abord la balance, quand on veut effectuer une pesée dans l'air, puis l'abaisser pour faire plonger les corps dans les liquides que l'on a placés au-dessous. — Une petite fourchette AB, fixée à la partie supérieure de la crémaillère, la suit dans ses mouvements : elle empêche le fléau d'exécuter de trop grandes oscillations, ou même de basculer. Une autre fourchette plus grande CD est fixée à la colonne; elle reçoit le fléau quand on fait descendre complétement la crémaillère pour mettre la balance au repos : elle empêche ainsi le couteau médian de s'émousser par les frottements, quand l'instrument n'est pas en expérience.

CHAPITRE II

HYDROSTATIQUE DES LIQUIDES

I. — ÉQUILIBRE DES LIQUIDES. — PRESSIONS EXERCÉES PAR LES LIQUIDES PESANTS

66. **Objet de l'hydrostatique.** — L'hydrostatique a pour objet l'étude des fluides à l'état d'équilibre.

Elle se divise naturellement en deux parties relatives, l'une aux liquides, et l'autre aux gaz. La première seule nous occupera dans ce chapitre.

67. **Les liquides peuvent être considérés comme doués d'une mobilité parfaite et comme absolument incompressibles.** — On regarde, en hydrostatique, les liquides comme doués d'une mobilité parfaite et comme absolument incompressibles.

La première hypothèse, celle de la mobilité parfaite, s'écarte peu de la vérité pour certains liquides tels que l'eau, l'éther, le sulfure de carbone. C'est ce dont il est facile de se convaincre en agitant vivement des flacons en partie remplis de ces liquides : l'écume produite par l'interposition des bulles d'air dans la masse se dissipe presque instantanément, tandis qu'elle persiste beaucoup plus longtemps sur d'autres liquides, tels que l'huile ou l'acide sulfurique, à cause de la résistance qu'éprouvent les molécules à reprendre leurs positions primitives d'équilibre. Cette résistance, qu'on désigne sous le nom de *viscosité*, existe dans tous les liquides à un degré plus ou moins considérable : nous supposerons, dans tout ce qui va suivre, qu'elle soit assez faible pour qu'on en puisse complétement négliger les effets. — Quant à la seconde hypothèse, celle de l'incompressibilité, c'est-à-dire de l'invariabilité du volume, elle peut également être admise comme exacte, dans tous les cas où les pressions exercées sur les liquides ne sont pas extrêmement considérables (*).

(*) Voir la note de la page 20.

68. **Principe fondamental de l'hydrostatique** ou **principe de la transmission des pressions.** — L'hydrostatique tout entière repose sur le principe suivant, énoncé par Pascal :

Si, sur une portion plane de la surface d'un liquide, on exerce une pression déterminée, cette pression se transmet intégralement à toute portion de paroi plane ayant une surface égale à la première.

On trouve une confirmation de ce principe dans la *presse hydraulique*, dont la première idée est due à Pascal.

Réduite à sa plus simple expression, cette machine se compose de deux cylindres verticaux A et B (*fig.* 44), de diamètres différents, qui communiquent par un tuyau CD. Dans chacun d'eux peut se mouvoir un piston, et l'intervalle compris entre les deux pistons est entièrement plein d'eau.

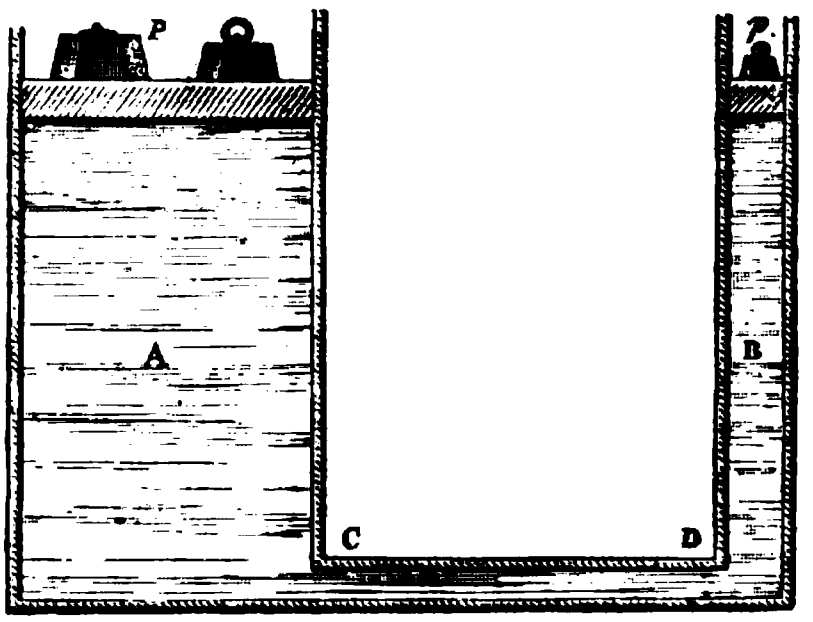


Fig. 44.

Supposons, pour fixer les idées, que la surface du plus grand piston P soit égale à 100 fois celle du plus petit *p*. Plaçons sur ce dernier un poids de 20 kilogrammes, par exemple ; il exercera sur le liquide qui est au-dessous de lui une pression verticale. Cette pression, d'après le principe énoncé, doit se transmettre sans altération à toute portion égale à *p* de la surface du piston P; donc, si le principe est exact, la pression totale transmise à ce dernier piston doit être égale à 100 fois 20 kilogrammes, ou à 2000 kilogrammes. On reconnaît, en effet, après avoir chargé le piston *p* du poids de 20 kilogrammes, que le piston P tend à s'élever dans le cylindre A, et que, pour le maintenir dans sa position première, il faut le charger d'un poids égal à 2000 kilogrammes.

Nous décrirons plus loin (chapitre VI) les détails de construction de la presse hydraulique, qui ont fait de cet appareil une des machines les plus utiles à l'industrie. — Observons, dès à présent, qu'elle permet de développer une force très-considérable à l'aide d'un effort très-petit. Mais, de même que, dans toutes les machines qu'on étudie en Mécanique, *ce qu'on gagne en force, on le dépense en chemin parcouru ;* car la section du cylindre A étant égale à 100 fois celle du cylindre B, la quantité dont pourra s'élever le piston P n'est évidemment que la centième partie de celle dont se sera abaissé le piston *p*.

69. **Remarque sur l'application du principe qui précède aux liquides pesants.** — Il résulte des explications précédentes que, toutes les fois qu'on exerce artificiellement une pression sur une portion

quelconque de la surface d'un liquide, si le liquide était dépourvu de pesanteur, des portions planes quelconques de la paroi supporteraient toujours des pressions *proportionnelles à leurs surfaces*. — En réalité, tous les liquides sont pesants, et les pressions qu'ils exercent en vertu de l'action de la pesanteur, sur des portions égales de parois, sont, ainsi qu'on le verra plus loin, d'autant plus grandes que ces parois sont situées à une profondeur plus grande. Dans le cas de la presse hydraulique, les pressions dues à la pesanteur étant, en général, très-petites par rapport aux pressions que l'on exerce sur l'appareil, les choses se passent à peu près comme si le liquide n'était pas pesant. Mais, dans les cas où ces deux espèces de pressions sont du même ordre de grandeur, on devra considérer la pression totale que supporte une portion de paroi comme égale à la somme de la pression transmise et de la pression due à la pesanteur. — Nous savons calculer la première, nous verrons bientôt comment on détermine la seconde.

70. **La pression exercée par un liquide en équilibre sur un élément de paroi est toujours normale à cet élément.** — Quelle que soit l'origine de la pression exercée sur un élément de paroi, par un liquide en équilibre, cette pression est toujours *normale* à l'élément considéré. — En effet, si la pression était oblique, elle pourrait se décomposer en deux forces, l'une normale et l'autre située dans le plan même de l'élément ; cette dernière aurait pour effet de faire glisser sur la paroi les molécules liquides par lesquelles s'exerce la pression, c'est-à-dire de rompre l'équilibre.

71. **Égalité de pression dans tous les sens autour d'un point, pris dans l'intérieur d'un liquide en équilibre.** — Les pressions que l'on exerce sur la surface d'un liquide se transmettent, non-seulement à la paroi du vase, mais encore à tout élément de surface pris dans l'intérieur du liquide.

Pour nous en rendre compte, imaginons un vase CD (*fig.* 45) entièrement rempli d'un liquide en équilibre, et supposons que sur une portion *mn* de la surface de ce liquide on exerce, à l'aide d'un piston A, une pression déterminée. Soit B un point quelconque, pris dans l'intérieur du liquide, et soit IH un plan quelconque, mené par ce point. L'équilibre ne sera pas troublé si nous supposons que les molécules liquides comprises dans ce plan viennent à être liées entre elles, de manière à constituer une paroi solide. Mais alors la partie AIHD devient elle-même un vase fermé. soit *pq* une portion très-petite du plan IH, comprenant le point B ; *pq* reçoit une pression dont le rapport à la pression exercée sur *mn* est égal au rapport même des

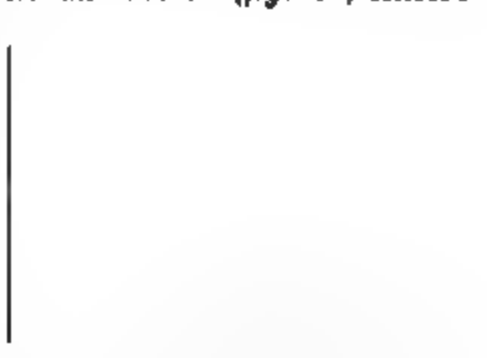


Fig. 45.

surfaces *pq* et *mn* (68), et cette pression est normale au plan *pq* (70). — Si maintenant on rend la mobilité à toutes les molécules, sauf à celles de la portion *pq*, on voit qu'il faut, pour que *pq* reste en équilibre, qu'il supporte sur son autre face une pression égale et contraire. — Or nous avons supposé au plan HH une direction absolument arbitraire : la pression reçue par la portion *pq* de ce plan ne dépend donc nullement de sa direction, et, si l'on imagine que cette petite surface plane prenne autour du point B toutes les positions possibles *pq*, *p'q'*, etc. (*fig.* 46), la pression normale qu'elle reçoit sur ses deux faces demeure invariable. — C'est là ce qu'on exprime, d'une manière abrégée, en disant que, *dans un liquide en équilibre, la pression est la même dans tous les sens autour d'un point*.

Fig. 46.

72. **Conditions d'équilibre d'un liquide pesant. — Égalité de pressions en tous les points d'un plan horizontal.** — Les principes qui précèdent suffisent pour résoudre toutes les questions relatives à l'équilibre des liquides, quelles que soient les forces qui les sollicitent. — Nous nous bornerons à les appliquer aux liquides qui sont *soumis à l'action de la pesanteur seule*, et que, pour abréger, nous appellerons simplement *liquides pesants*.

La condition générale d'équilibre d'un semblable liquide est la suivante :

Dans tout liquide pesant en équilibre, la pression est la même en tous les points d'un même plan horizontal.

Supposons d'abord que le liquide remplisse entièrement un vase ABCD (*fig.* 47) fermé de toutes parts. Soit *m* et *m'* deux points pris dans un même plan horizontal. Imaginons un cylindre circulaire droit, ayant pour bases deux petits cercles *ef*, *e'f'*, décrits autour de *m* et de *m'* avec des rayons infiniment petits. Si nous supposons que toutes les molécules comprises dans ce cylindre soient liées entre elles, de manière à constituer un corps solide, au milieu du fluide environnant, ce solide demeurera évidemment en équilibre sous l'action des forces qui le sollicitent, c'est-à-dire sous l'action de son poids et des pressions que le liquide exerce sur toute sa surface. — Or le poids P est perpendiculaire à *mm'*; les pressions exercées sur les divers éléments de la surface convexe sont également perpendiculaires à *mm'*; aucune de ces forces ne sollicite le cylindre dans le sens

Fig. 47.

de son axe. Au contraire, les pressions p et p', exercées sur les bases, sont dirigées suivant l'axe même du cylindre. Donc, si le cylindre est en équilibre, c'est que, d'une part, la résultante des pressions exercées sur la surface convexe est une force égale et opposée au poids P, et que, d'autre part, les forces p et p' sont égales entre elles.

Rendons maintenant la fluidité au cylindre, à l'exception des molécules situées dans les éléments plans ef, $e'f'$. Chacun de ces éléments éprouvera, sur ses deux faces, des pressions égales à p ; et il en sera encore de même si l'on donne aux éléments des directions quelconques autour de m et de m'. — C'est là ce qu'on exprime, d'une manière abrégée, en disant que, dans un liquide pesant en équilibre, la pression est la même en tous les points d'un même plan horizontal.

73. Différence des pressions supportées par des éléments égaux, non situés sur un même plan horizontal. — Considérons un cylindre $efe'f'$ (*fig.* 48), dont les bases soient situées dans les plans horizontaux AC, A'C', et dont les arêtes soient verticales. Solidifions encore, par la pensée, les molécules liquides comprises dans le cylindre. Les seules forces qui tendent à déplacer le solide dans le sens de son axe sont : le poids P, appliqué au centre de gravité G, et les deux pressions p et p', normales aux bases. Puisque l'équilibre existe, la pression p', dirigée de bas en haut, doit être égale à la résultante des deux forces p et P dirigées de haut en bas, ou à leur somme $p + P$.

Fig. 48.

Donc *la pression qui s'exerce sur l'élément $e'f'$ est égale à la pression que supporte l'élément égal ef, plus le poids d'une colonne cylindrique de liquide ayant pour base l'un des éléments et pour hauteur la distance des plans horizontaux* AC *et* A'C'.

La même proposition s'appliquerait à deux éléments égaux ef, $e''f''$, non compris entre les mêmes verticales, puisque $e'f'$ et $e''f''$ éprouvent des pressions égales.

74. La surface libre d'un liquide pesant doit être plane et horizontale. — Supposons qu'un liquide pesant ne remplisse pas entièrement le vase qui le contient, et qu'il se termine à une *surface libre* dont les divers éléments ne supportent aucune pression.

Fig. 49.

Soit BB' la surface libre (*fig.* 49) : prenons, dans un plan horizontal AC mené au-dessous de cette surface, deux éléments égaux m, n, et construisons les cylindres verticaux mm', nn', qui ont ces éléments pour ba-

ses et se terminent à la surface libre. La pression sur la surface libre étant nulle, la pression en m est égale au poids du liquide contenu dans le cylindre mm' (73) ; en n, au poids du liquide contenu dans le cylindre nn'. Or ces deux pressions doivent être égales entre elles (72) ; donc tous les points tels que m' et n' doivent être à la même distance du plan horizontal AC, c'est-à-dire que la surface libre doit être elle-même *plane et horizontale.*

75. **Pression exercée par un liquide pesant sur le fond horizontal d'un vase.** — Prenons, sur le fond horizontal d'un vase ABCD (*fig.* 50), un élément de surface mn, et décrivons un cylindre vertical ayant cet élément pour base ; supposons que toutes les arêtes rencontrent la surface libre du liquide, elles y découperont un élément $m'n'$ égal à mn. Or la pression que le liquide exerce sur mn, en vertu de son poids, surpasse la pression en $m'n'$ (73), d'une quantité égale au poids d'une colonne cylindrique de liquide ayant pour base mn et pour hauteur la distance $m'n'$ de la surface libre AD au fond BC du vase (*) — Décomposons maintenant la paroi horizontale BC tout entière en éléments tels que mn ; les pressions verticales que supportent ces éléments se composeront en une seule, égale à leur somme. Donc :

Fig. 50.

La pression exercée par un liquide pesant sur le fond horizontal du vase qui le contient, est égale au poids d'une colonne cylindrique de ce liquide ayant pour base la surface du fond et pour hauteur sa distance au plan de la surface libre.

76. **Vérification expérimentale.** — D'après l'énoncé qui précède, si l'on considère trois vases comme ceux de la figure 52, l'un A cylindrique, le deuxième B élargi, et le troisième C rétréci à la partie supérieure, mais ayant des fonds égaux, et si ces trois vases contiennent un même liquide, s'élevant à la même hauteur au-dessus du plan du fond, les pressions doivent être égales sur les trois fonds. — Ce résultat peut

(*) Il est encore de même si la forme du vase et la situation de l'élément mn sont telles que les arêtes du cylindre construit sur cet élément ne rencontrent pas la surface libre (*fig.* 51). Pour le démontrer, prenons sur la surface libre un élément $m'n'$ égal à mn, et projetons mn et $m'n'$ sur un plan horizontal IH, situé de façon que les deux projections pq et $p'q'$, soient dans l'intérieur du liquide. En mn, la pression est égale à la pression en pq, augmentée du poids du cylindre $mnpq$; en pq, la pression est la même qu'en $p'q'$, c'est-à-dire qu'elle est égale au poids du cylindre $p'q'm'n'$. Donc la pression en mn est égale au poids d'une colonne cylindrique de liquide qui aurait pour base mn, et pour hauteur la distance mK au plan de la surface libre.

Fig. 51.

être vérifié à l'aide d'une disposition qui a été proposée par A. Masson, et qui est une modification d'un appareil imaginé par Pascal.

Trois vases A, B, C, sans fond (*fig.* 52), de formes différentes, mais présentant à leur partie inférieure des ouvertures égales, peuvent se visser

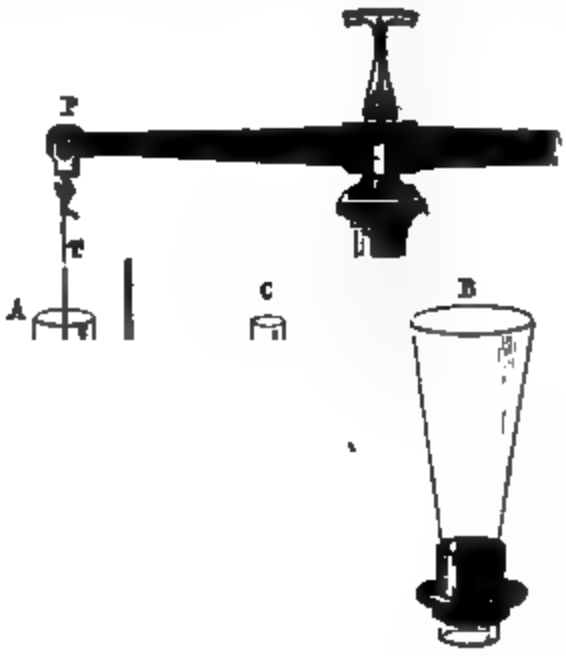


Fig. 52. — Appareil de A. Masson.

sur un trépied métallique ; l'un deux A étant placé sur ce trépied, on applique sur son ouverture inférieure un *obturateur* MN, c'est-à-dire un disque de verre bien plan, qu'on suspend par un fil T à l'extrémité P de l'un des bras d'une balance : on place ensuite des corps pesants dans le plateau qui est à l'extrémité de l'autre bras, de manière à appliquer assez fortement l'obturateur sur le bord de l'ouverture. On verse alors de l'eau avec précaution dans le vase, jusqu'à ce que l'obturateur se détache et laisse échapper quelques gouttes de liquide ; à ce moment, la pression exercée de haut en bas sur ce fond mobile par le liquide est égale en grandeur à la force avec laquelle il est maintenu contre les bords de l'ouverture ; on marque le niveau de l'eau au moyen du petit index E, mobile le long d'une tige verticale. — On remplace alors successivement le vase A par les vases B et C, sans toucher à l'index : l'expérience montre que l'obturateur se détache toujours au moment où le liquide atteint le même niveau.

La pression est donc *la même sur le fond des trois vases* ; quant à sa

valeur absolue, on peut la déterminer, au moins grossièrement, en plaçant sur l'obturateur, au lieu d'eau, des poids marqués : on trouve que la somme des poids nécessaires pour le détacher est précisément égale au poids total de l'eau qu'on avait dû verser dans le vase cylindrique A. Il en résulte que, pour le vase élargi B, la pression exercée sur le fond est inférieure au poids de l'eau que contient le vase ; dans un vase rétréci tel que C, elle est au contraire supérieure au poids total de l'eau.

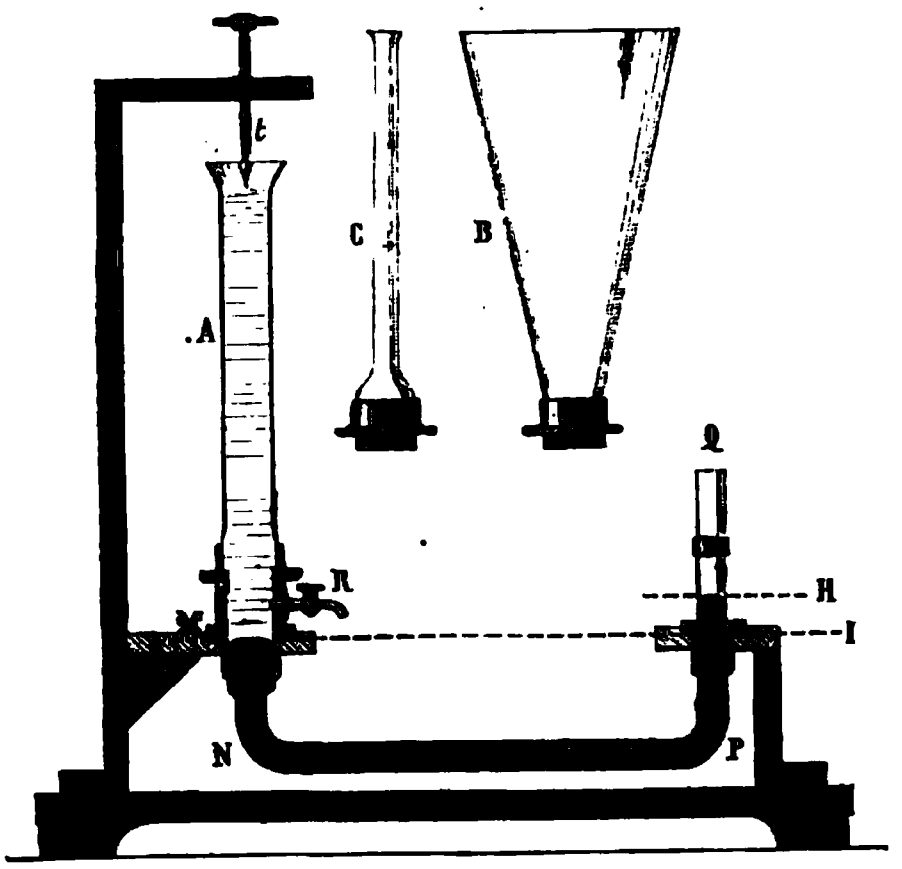


Fig. 53. — Appareil de Haldat.

L'appareil de de Haldat (*fig.* 53) conduit à la même vérification. — Le tube de verre deux fois recourbé MNPQ s'engage en M dans une monture de fonte, sur laquelle peuvent se visser à volonté les trois vases A, B, C. On introduit du mercure dans le tube recourbé ; puis, le vase A étant mis en place, on y verse de l'eau jusqu'à ce que le niveau atteigne l'extrémité de la pointe verticale *t*, et l'on marque le point H auquel s'est élevé le mercure dans la branche PQ, au moyen d'une bague qui glisse le long du tube. On retire ensuite, en ouvrant le robinet R, l'eau du vase A ; on enlève ce vase, et on recommence l'expérience avec chacun des vases B et C : on constate toujours que, à l'instant où le niveau de l'eau atteint l'extrémité de la tige *t*, celui du mercure dans la branche PQ vient affleurer au bord de l'anneau demeuré en H. — Donc la pression supportée par la surface du mercure dans la cuvette est la même dans les trois expériences, bien que les formes des vases auxquels cette surface sert successivement de fond soient très-différentes.

77. **Pressions sur les parois latérales.** — L'existence des pressions sur les parois latérales peut se démontrer par l'expérience, en pratiquant des ouvertures dans les parois d'un vase : le liquide s'échappe par chaque ouverture, en formant un jet qui est d'abord normal à la surface enlevée et qui s'infléchit ensuite sous l'influence de la pesanteur. Les molécules liquides qui touchaient la paroi exerçaient donc contre elle une pression normale.

Pour évaluer cette pression, prenons sur une paroi latérale d'un vase ABCD (*fig.* 54) un élément de surface *mn*, que nous supposerons assez petit pour pouvoir le considérer comme plan, et pour pouvoir regarder les distances verticales de tous ses points au plan de la surface

libre comme égales entre elles. Cet élément éprouve, de la part du liquide, une pression normale à sa surface et égale à celle qu'il supporterait si, venant à tourner autour de l'un quelconque de ses points, il se plaçait dans une position horizontale (71) ; cette pression est donc égale au poids d'une colonne cylindrique droite de liquide, ayant pour base *mn* et pour hauteur la distance de cet élément au plan de la surface libre.

Fig. 54.

Si, au lieu d'un élément infiniment petit, on considère une portion plane et finie de paroi latérale, chacun des éléments dans lesquels on peut la décomposer supportant une pression normale, toutes ces pressions auront une résultante normale à la paroi et égale à leur somme. — On établit, en Mécanique, que cette résultante est égale au poids d'une colonne cylindrique droite de liquide ayant pour base la portion de paroi considérée, et pour hauteur la distance de son centre de gravité au centre de la surface libre. Elle est d'ailleurs appliquée en un point qu'on appelle le *centre de pression*, lequel est évidemment situé plus bas que le centre de gravité de la portion de paroi.

78. **Paradoxe hydrostatique.** — Supposons que l'on porte successivement sur l'un des plateaux d'une balance les trois vases A, B, C (*fig.* 52), contenant de l'eau jusqu'à une même hauteur ; négligeons, pour plus de simplicité, le poids des vases eux-mêmes, dont il serait facile de tenir compte. La pression qu'exerce le liquide sur le fond qui repose sur le plateau, est la même pour chacun des trois vases, et cependant il faudrait, pour leur faire tour à tour équilibre, placer dans le plateau opposé des poids inégaux.

Cette apparente contradiction, connue sous le nom de *paradoxe hydrostatique*, disparaît quand on a égard à l'ensemble des pressions que le liquide exerce sur les parois. — Il est facile de voir, en effet, que les pressions *p*, exercées sur les différents éléments d'une paroi telle que AB (*fig.* 55) qui fait un angle obtus avec le fond, peuvent se décomposer chacune en deux forces, l'une horizontale *f'* et l'autre verticale *f* ; les composantes verticales, étant dirigées dans le sens de la pesanteur, s'ajoutent à la pression exercée sur le fond et se communiquent, par l'intermédiaire de la paroi solide, au plateau de la balance : le plateau supporte donc une pression plus grande que celle qui s'exerce sur le fond même du vase. — Sur une paroi faisant un angle aigu avec le fond, chaque pression élémentaire *p* (*fig.* 56) se décompose en une force horizontale *f'*

Fig. 55.

Fig. 56.

et en une force verticale f dirigée en sens contraire de la pesanteur; donc la pression supportée par le plateau de la balance est la différence entre la pression supportée par le fond du vase et la résultante des forces f.

On complète cette explication, en Mécanique, en démontrant que, quelle que soit la forme du vase, toutes les pressions élémentaires supportées par l'ensemble des parois ont une résultante unique, exactement égale au poids du liquide contenu dans le vase.

79. **Tourniquet hydraulique.** — Considérons un vase ABCD (*fig.* 57), dont nous supposerons, pour plus de simplicité, les deux parois opposées AB et CD planes, verticales et parallèles. Prenons sur l'une d'elles une portion quelconque mn pour base d'un cylindre ayant ses arêtes perpendiculaires au plan AB; ce cylindre découpe sur le plan CD une portion $m'n'$ égale à mn. Les pressions que le liquide exerce sur mn et sur $m'n'$ sont deux forces p et p' égales et contraires, qui se font équilibre; mais si l'on vient à enlever la portion de paroi $m'n'$, la pression p' n'a d'autre effet que de faire jaillir le liquide, tandis que la force p tend à imprimer

Fig. 57.

Fig. 58. — Tourniquet hydraulique.

au vase un mouvement de *recul*, en sens contraire de l'écoulement. C'est ce que l'on peut d'ailleurs constater en plaçant le vase sur un petit chariot.

Le *tourniquet hydraulique* (*fig.* 58) est fondé sur le même principe. Un

réservoir de verre MN, rempli d'eau, est disposé de manière à pouvoir tourner autour d'un axe vertical; il communique, à sa partie inférieure, avec un tube de cuivre deux fois recourbé *ab*, qui a la forme d'un Z très-allongé. A l'instant où l'eau s'échappe par les extrémités de ce tube, on voit l'appareil prendre un mouvement de rotation, en sens contraire de l'écoulement de l'eau. Ce mouvement de recul est produit par les pressions que le liquide exerce sur les portions du tube opposées aux ouvertures par lesquelles il s'échappe.

80. **Vérification expérimentale de quelques autres conséquences des principes précédents.** — Il résulte de ce qui précède qu'une portion de paroi solide, placée horizontalement, et en contact par sa face inférieure avec un liquide pesant dont la surface libre est à un niveau plus élevé, doit éprouver une pression verticale de bas en haut. Comme vérification de cette conséquence de la théorie, nous citerons les deux expériences suivantes.

On prend un large tube de verre, fermé à la partie inférieure par un disque plan *ab* (*fig.* 59) que l'on maintient d'abord au moyen d'un fil fixé en son centre : si l'on enfonce ce tube verticalement dans l'eau, le disque éprouve une pression qui l'applique fortement contre l'ouverture, car on peut abandonner le fil sans que le disque se détache. — Si maintenant on veut déterminer expérimentalement la valeur de cette pression, on versera, avec précaution, de l'eau dans le tube, et l'on constatera que le disque se détache au moment où le niveau intérieur arrive sur le plan du niveau extérieur : or, à ce moment, l'intérieur du tube constitue un vase sur le fond duquel s'exerce, de haut en bas, une pression que nous savons évaluer (75) : donc la pression équivalente qui s'exerce de bas en haut sur *ab* est égale au poids d'une colonne cylindrique de liquide ayant pour base cette surface et pour hauteur la hauteur du liquide au-dessus d'elle.

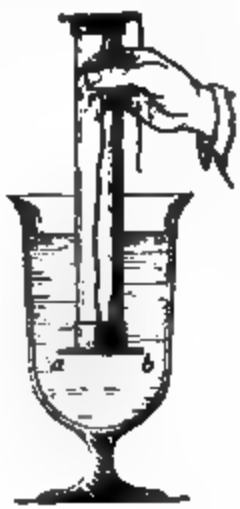


Fig. 59. Fig. 60.

On emplit d'eau un tonneau (*fig.* 60) reposant sur le sol par sa base inférieure : au centre de la base supérieure, on fixe verticalement un long tube de

verre, et l'on verse de l'eau dans ce tube jusqu'à une hauteur de plusieurs mètres. On voit la base supérieure, sous l'influence de la pression énorme qu'elle supporte alors de bas en haut, devenir d'abord convexe, puis bientôt se briser en éclats. — Cette expérience est particulièrement remarquable par le contraste entre la petitesse du poids de la colonne d'eau qui est contenue dans le tube, et la grandeur de la pression à laquelle elle donne naissance sur la surface de la base du tonneau.

81. **Conditions d'équilibre des liquides superposés.** — Nous avons montré (72) que, pour qu'un liquide pesant demeure en équilibre, il faut que la pression soit la même en tous les points d'un même plan horizontal. Le raisonnement qui a été fait s'applique, sans modification, au cas où le vase ABCD (*fig.* 61) contient deux liquides superposés, non susceptibles de se mélanger, de l'eau et de l'huile par exemple. On voit immédiatement :

Fig. 61.

1° *Que la surface libre doit être plane et horizontale;*

2° *Que la surface de séparation doit être aussi un plan horizontal;* en effet, si cette surface pouvait affecter une forme telle que EF, il serait impossible que deux éléments égaux, m, m', pris sur un même plan horizontal lH et dans le liquide inférieur, fussent également pressés.

Ces conditions étant remplies, pour que l'équilibre soit possible, il faut encore que celui des deux liquides qui pèse le plus (à volume égal), occupe la partie inférieure du vase.

Il en est évidemment de même, quel que soit le nombre des liquides superposés. — L'expérience s'exécute ordinairement avec du mercure, de l'eau et de l'huile.

82. **Conditions d'équilibre des liquides contenus dans des vases communiquants.** — *Premier cas : un même liquide dans deux vases communiquants.* — Lorsque deux vases communiquants contiennent un même liquide, il faut, pour qu'il y ait équilibre, *que les surfaces libres soient dans un même plan horizontal.*

Soit V et V′ (*fig.* 62) deux vases communiquants de forme quelconque; imaginons dans le tube de communication une section par un plan quelconque, et supposons que les molécules comprises dans cette section soient solidifiées. Un élément infiniment petit mn de la section doit supporter, sur ses deux faces, des pressions normales p et p' égales entre elles. Pour évaluer ces pressions, on peut regarder mn comme étant, par l'une de ses faces, une portion de

Fig. 62.

paroi du vase V; par l'autre, une portion de paroi du vase V'. La pression p est donc équivalente au poids d'un cylindre liquide ayant pour base mn et pour hauteur la distance de cet élément au plan de la surface libre AB; de même, la pression p' est équivalente au poids d'un cylindre liquide ayant pour base mn et pour hauteur la distance de cet élément au plan de la surface libre CD. Puisque ces deux pressions doivent être égales, les distances de mn aux deux plans horizontaux AB et CD doivent être les mêmes; en d'autres termes, les deux surfaces libres doivent être dans un même plan horizontal.

On vérifie qu'il en est ainsi, au moyen de l'appareil représenté par la figure 63. Le réservoir de verre V, contenant de l'eau, communique par un tuyau horizontal M avec le tube droit A, qu'on peut remplacer à vo-

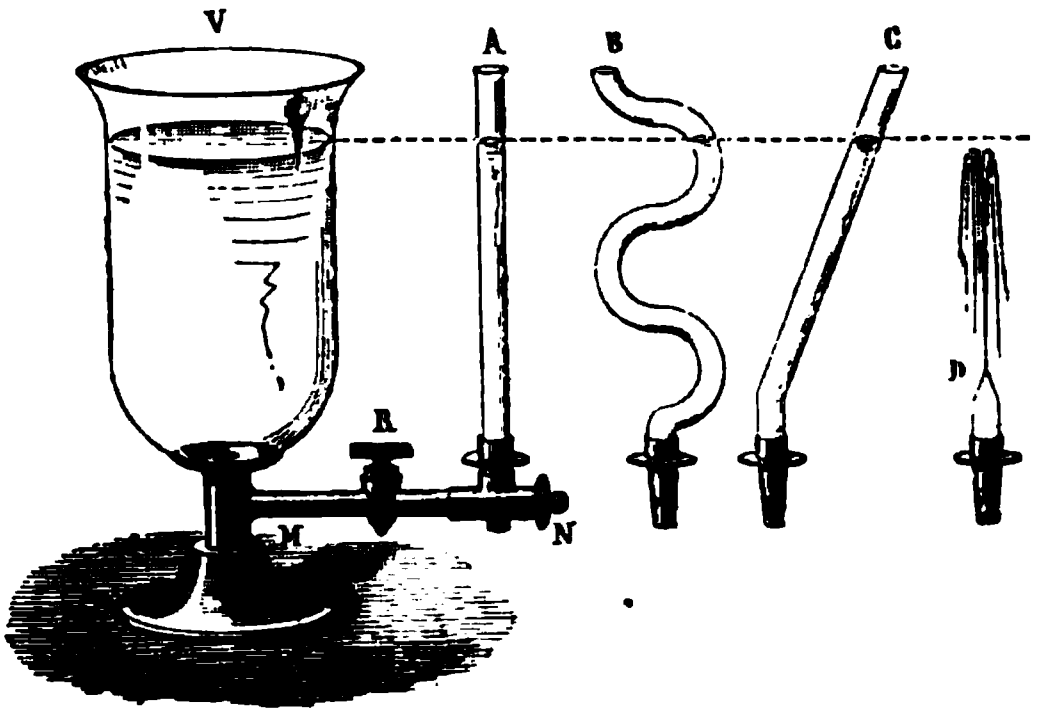


Fig. 63. — Vases communiquants.

lonté, soit par le tube sinueux B, soit par le tube incliné C; un robinet permet d'intercepter et de rétablir la communication. Le liquide s'élève, dans chacun de ces tubes, jusqu'à ce qu'il atteigne le prolongement de la surface libre dans le réservoir.

Si l'un des tubes est interrompu au-dessous du plan de cette surface, ou, en d'autres termes, si l'on fait communiquer avec le vase V un petit tube tel que D, on voit, au moment où l'on ouvre le robinet R, l'eau jaillir à peu près jusqu'au même niveau. — Cependant l'expérience montre que le jet n'atteint cependant jamais tout à fait cette hauteur; la différence doit être attribuée au frottement de l'eau contre les parois, et aussi à ce que les gouttes de liquide qui retombent, rencontrant celles qui s'élèvent, en diminuent la vitesse.

83. *Deuxième cas: deux liquides superposés dans un système de vases communiquants.* — Lorsque deux vases communiquants contiennent deux liquides pesants superposés, il faut, pour qu'il y ait équilibre, *que les*

hauteurs des deux liquides au-dessus du plan de la surface de séparation soient en raison inverse de leurs poids spécifiques.

Prenons encore les deux vases V et V′; versons-y d'abord une certaine quantité de mercure, puis achevons de remplir le vase V avec de l'eau (*fig.* 64) : la pression de l'eau déprime le mercure à gauche et le fait monter à droite. L'équilibre étant établi, menons par un point quelconque I de l'élément *mn* une verticale IL, qui rencontre le plan de la surface de séparation et les plans des deux surfaces libres, respectivement aux points H, K, L. La pression normale *p* que reçoit *mn* du côté du vase V est équivalente à la somme des poids d'une colonne cylindrique de mercure ayant pour base *mn* et pour hauteur IH, et d'une colonne d'eau ayant pour base *mn*, et pour hauteur HL; la pression *p′* exercée sur le même élément du côté du vase V′ est équivalente au poids d'une colonne de mercure ayant pour base *mn*, et pour hauteur IK ou IH + HK. Pour que l'équilibre existe, il faut que ces deux pressions *p* et *p′* soient égales; or elles ont une partie commune, savoir le poids de la colonne de mercure qui a pour hauteur IH : il doit donc y avoir égalité entre les deux parties restantes, c'est-à-dire entre le poids de la colonne d'eau ayant pour hauteur HL, et le poids de la colonne de mercure ayant pour hauteur HK. Or des volumes égaux d'eau et de mercure ont des poids qui sont dans le rapport de 1 à 13,6, ce qu'on exprime en disant que les *poids spécifiques* de l'eau et du mercure sont dans le rapport de 1 à 13,6 ; pour que les poids de ces deux colonnes de même base soient égaux, il faut donc que les hauteurs HL et HK soient dans le rapport de 13,6 à 1, c'est-à-dire en raison inverse des poids spécifiques.

Fig. 64.

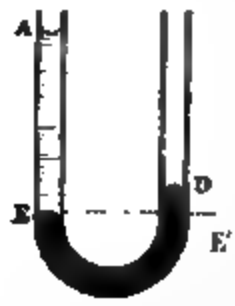


Fig 65

L'expérience peut être réalisée au moyen d'un tube en forme d'U (*fig.* 65), dans lequel on verse d'abord du mercure de manière à remplir la partie courbée, jusqu'à une petite hauteur dans chacune des branches. On ajoute ensuite de l'eau dans l'une des branches verticales, et l'on constate que la hauteur EA de cette eau est égale à treize fois et demie la hauteur E′D du mercure au-dessus de la surface de séparation des deux liquides.

84. Applications de ces principes. — Le premier cas de la théorie des vases communiquants conduit à l'explication des phénomènes que présentent les *sources*, les *puits artésiens* et les *jets d'eau* artificiels.

Lorsqu'une masse d'eau un peu considérable A (*fig.* 66) trouve dans le sol des fissures, par lesquelles elle peut pénétrer jusque dans l'intervalle

de deux couches à peu près imperméables, comme des couches d'argile ou de marne, elle forme là une sorte de nappe souterraine MN. Si l'on vient à pratiquer des puits en des points C, D situés à des niveaux plus

Fig. 66.

élevés que A, et jusqu'à la rencontre de cette nappe, l'eau s'y élève jusqu'au niveau du plan horizontal passant par la surface en A; c'est là ce qui arrive dans les puits ordinaires, où l'eau se trouve à une profondeur plus ou moins grande au-dessous du sol, selon l'altitude des points C et D; on conçoit qu'on en puisse souvent extraire une quantité d'eau très-considérable, sans que le niveau du liquide dans le puits soit sensiblement abaissé.

Si l'on vient à pratiquer des puits en des points E, F, situés plus bas que A, l'eau peut s'élever dans un tube dressé verticalement au-dessus du sol, comme au point F, ou jaillir à une hauteur plus ou moins grande, comme en E. Ces puits portent le nom de *puits artésiens*, parce que c'est dans l'Artois qu'ont été creusés les premiers qui aient été pratiqués en France.

On se place dans les mêmes conditions pour obtenir la plupart des *jets d'eau* artificiels. Un réservoir étant disposé dans un lieu assez élevé, on le fait communiquer avec des conduits souterrains, qui vont s'ouvrir à la surface de bassins situés beaucoup plus bas : des robinets placés sur ces conduits permettent d'intercepter ou de rétablir à volonté le passage de l'eau. La direction du jet est déterminée par celle de l'orifice de sortie, et, pour que ce jet s'élève le plus haut possible, on fait en sorte qu'il soit légèrement incliné, plutôt qu'exactement vertical.

85. Niveau d'eau. — L'instrument connu dans l'arpentage sous le nom de *niveau d'eau* est fondé sur les mêmes principes; il est destiné à mesurer les différences de hauteur des divers points d'un terrain. Il se compose d'un tube de métal (*fig.* 67), dont les deux extrémités coudées à angle droit se continuent avec les parois de deux fioles de verre sans fond, M et N; on place ce tube à peu près horizontalement sur un trépied dont les branches peuvent s'écarter à volonté, et permettent d'installer l'instrument sur un terrain quelconque. On verse de l'eau dans l'appareil, de

façon que les surfaces du liquide soient visibles dans les deux fioles; le plan MN, qui passe par ces deux surfaces, est horizontal.

Quand l'arpenteur veut connaître la différence de niveau de deux points

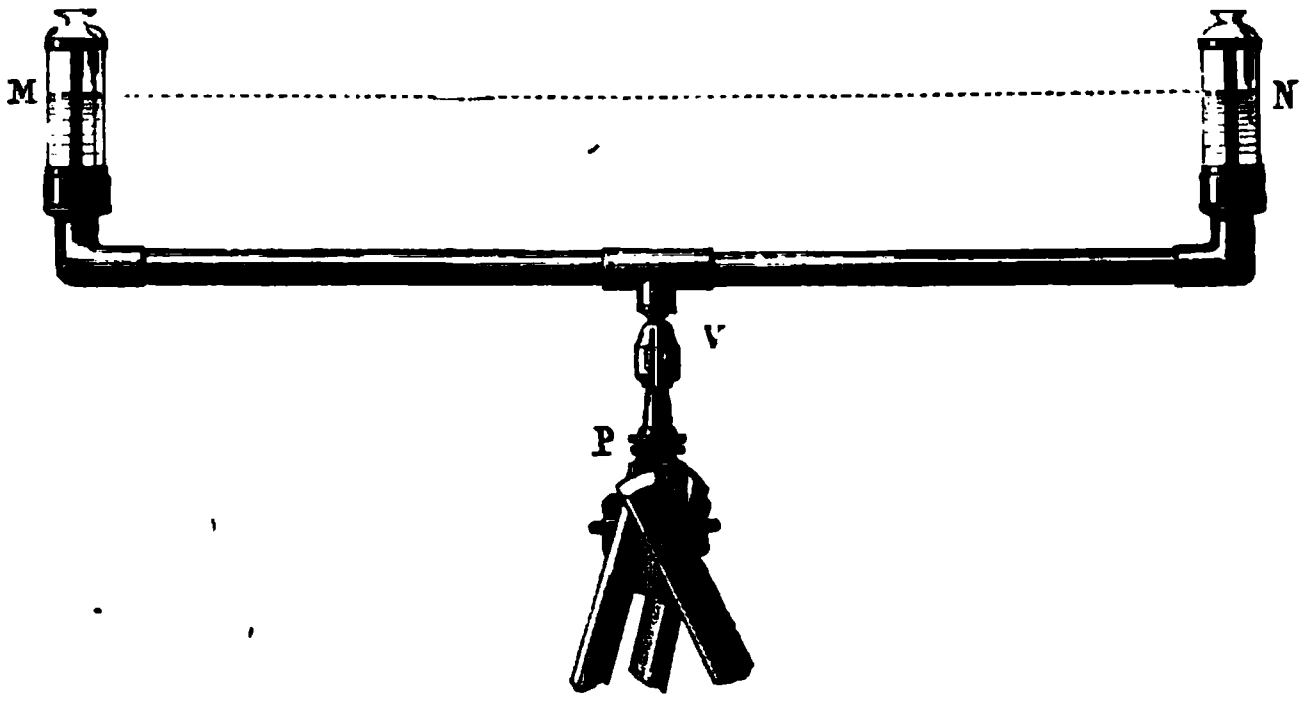


Fig. 67. — Niveau d'eau.

B et B′ d'un terrain, il place l'instrument en un point intermédiaire A (*fig.* 68), et fait dresser verticalement en B, par un aide, une longue règle graduée; sur celle-ci se meut une plaque subdivisée en quatre carrés, dont

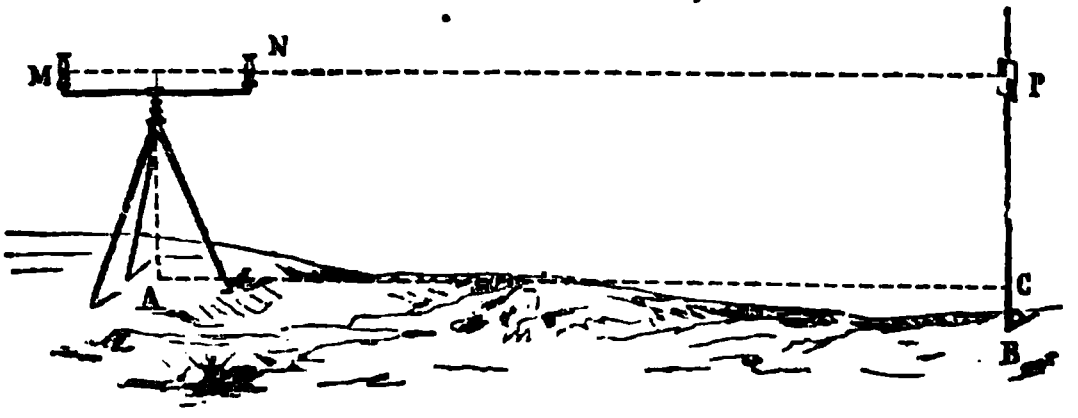


Fig. 68.

deux sont peints en blanc, et les deux autres en rouge ou en noir; c'est la *mire* de l'instrument. L'arpenteur, plaçant l'œil en M à la surface du liquide, fait avec la main le signe d'élever ou d'abaisser la plaque jusqu'à ce qu'il aperçoive, sur le prolongement du rayon visuel qui rase la surface de l'eau en N, le centre P de la plaque, c'est-à-dire le sommet commun aux quatre carrés, que la différence des couleurs rend facile à distinguer de loin. La position de la plaque une fois fixée, on note la hauteur BP mesurée sur la règle. — L'arpenteur fait alors transporter la mire au point B′ (qu'on a supposé à gauche, en dehors de la figure); il détermine de même la position du point P′ qui se trouve dans le même plan horizontal que P, et la hauteur B′P′ de ce point au-dessus du sol. — La différence des hauteurs BP et B′P′ donne évidemment la différence de niveau des points B et B′.

86. **Niveau à bulle d'air.** —On désigne sous ce nom un petit appareil représenté par la figure 69, et dont on se sert fréquemment pour vérifier l'horizontalité d'un plan ou de l'axe d'une lunette.

Il consiste en un tube de verre légèrement bombé, dans lequel on a introduit de l'eau ou de l'alcool, en y laissant seulement une bulle d'air, et qu'on a fermé ensuite à ses deux extrémités. Ce tube est contenu dans une gaine de cuivre, évidée de manière à laisser voir le tube à la partie supérieure, et fixée sur une plaque de même métal. La bulle d'air *mn*, en vertu de sa légèreté spécifique, tend constamment à occuper la partie la plus élevée du tube ; on règle, une fois pour toutes, la position de la gaine par rapport à la plaque, au moyen d'une vis placée à l'une des extrémités, de telle manière, que, la plaque étant placée horizontalement, les deux extrémités de la bulle s'arrêtent à égale distance du milieu de la graduation *ba*. — L'instrument étant ainsi réglé une fois pour toutes, pour vérifier l'horizontalité d'un plan quelconque, il suffit d'y placer le niveau dans deux positions successives non parallèles, et de s'assurer qu'à chaque fois les extrémités de la bulle viennent se fixer à égale distance du milieu.

Fig. 69. — Niveau à bulle d'air.

II. — PRINCIPE D'ARCHIMÈDE.

87. **Principe d'Archimède.** — *Tout corps plongé dans un liquide pesant éprouve une poussée, de bas en haut, égale en grandeur au poids du liquide déplacé.*

Ce principe peut être démontré par le raisonnement suivant :

Considérons un liquide pesant en équilibre et supposons qu'une portion MN de ce liquide (*fig.* 70) vienne à se solidifier, sans changer ni de poids ni de volume ; le corps solide ainsi formé demeurera en équilibre au milieu du fluide environnant. Or les forces qui le sollicitent sont, d'une part son poids P, appliqué en son centre de gravité G, d'autre part les pressions *p* exercées par le liquide normalement à chacun des éléments de la surface du corps. Puisque toutes ces forces se font équilibre, la force P est égale et directement opposée à la résultante des forces *p* (22) : d'où l'on conclut :

Fig. 70.

1° Que toutes les forces *p* ont une résultante ;

2° Que cette résultante, qu'on nomme la *poussée* du liquide, est égale

et contraire au poids P du corps MN, ou, ce qui est la même chose, au poids du liquide déplacé ;

3° Qu'elle passe constamment par le centre de gravité du corps.

Substituons maintenant, au corps solide idéal que nous avons considéré jusqu'ici, un corps solide formé d'une substance quelconque, dont la surface se confonde avec la sienne. Rien ne sera changé dans les pressions exercées sur les différents éléments de cette surface ; ces pressions se composeront donc toujours en une *poussée* verticale P (*fig.* 71), dirigée en sens contraire de la pesanteur, égale au poids du liquide déplacé, et appliquée au centre de gravité G de ce liquide. Quant au poids du corps lui-même, c'est maintenant une force verticale P′, généralement différente de P, et appliquée au centre de gravité G′ de ce corps.

Fig. 71.

Si le corps est homogène, comme l'était le liquide dont il tient la place, les points G et G′ se confondent. Alors les deux forces P et P′ se composent en une seule force verticale, égale à leur différence et agissant dans le sens de la plus grande.

Si le corps n'est pas homogène, sous l'influence des forces P et P′, il s'oriente de façon que les points G et G′ se placent sur une même verticale ; dans cette position, les forces P et P′ ont encore une résultante unique, égale à leur différence et agissant dans le sens de la plus grande. — On aura donc à distinguer trois cas, suivant les grandeurs relatives du poids et de la poussée.

88. *Premier cas.* — Si P′ > P, c'est-à-dire si le poids du corps est plus grand que le poids du liquide déplacé, la résultante des deux forces est dirigée de haut en bas, et tend à faire tomber le corps au fond du liquide. Cette résultante est égale à P′ — P, en sorte que le *poids apparent* du corps dans le liquide est égal à l'excès de son poids réel sur le poids du liquide déplacé.

On vérifie cette conséquence par une expérience fort simple. — On prend un cylindre métallique plein D (*fig.* 72) et un cylindre creux C, ouvert à sa partie supérieure et dont la capacité est exactement égale au volume extérieur du premier. On suspend sous l'un des plateaux A de la balance hydrostatique le cylindre creux, et au-dessous de lui, à l'aide d'un fil de métal, le cylindre plein. Dans l'autre plateau B de la balance, on place une tare que l'on règle de manière à rendre le fléau horizontal. On soulève le fléau, on amène sous le cylindre D un vase V plein d'eau, et l'on fait redescendre le fléau. Dès que le cylindre D arrive en contact avec le liquide, le poids de la tare l'emporte ; et le fléau s'incline de plus en plus, à mesure que D plonge plus profondément. Quand l'immersion est complète, on constate que, pour ramener le fléau à la position horizontale, c'est-à-dire pour compenser l'effet de la poussée du liquide sur le cylin-

dre plongé, il suffit d'emplir d'eau le cylindre supérieur C. La poussée est donc une force égale et contraire au poids de l'eau que peut contenir ce cylindre, ou au poids de l'eau que déplace le cylindre immergé.

On exprime quelquefois ce résultat en disant qu'un corps plongé dans un liquide *perd une partie de son poids*, égale au poids du liquide déplacé.

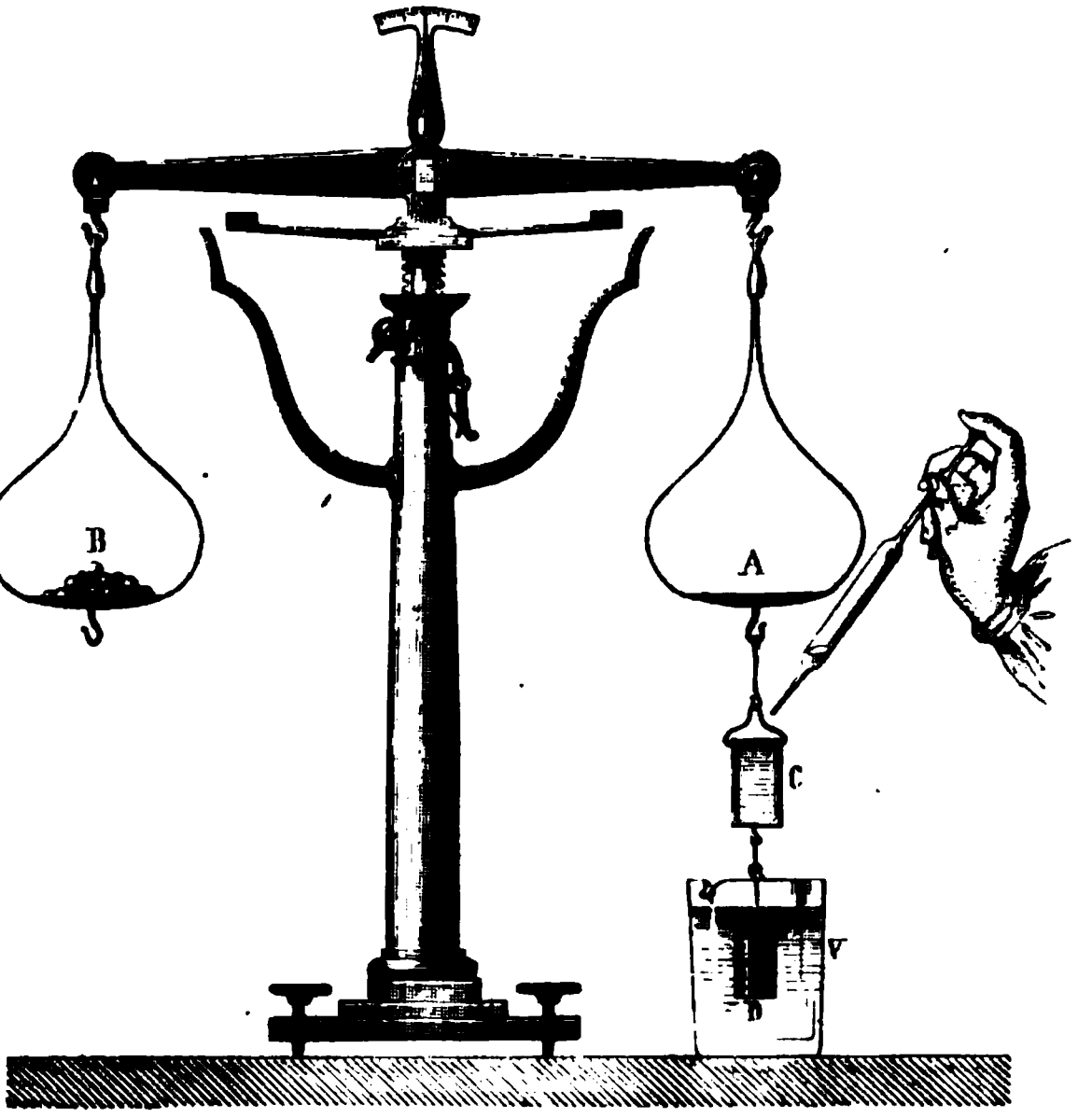


Fig. 72.

—Les explications qui précèdent indiquent suffisamment le sens qu'on doit attacher à cette locution.

89. *Deuxième cas.* — Si $P' = P$, c'est-à-dire si le poids du corps plongé est égal à celui du liquide qu'il déplace, les deux forces se font équilibre, et le corps ne tend ni à s'élever ni à s'abaisser dans le liquide. — S'il est homogène, en sorte que les deux centres de gravité G et G′ (*fig.* 71) se confondent, il demeure en *équilibre indifférent* dans toutes ses positions au sein du liquide. —Si le corps n'est pas homogène, et si les deux points G et G′ sont différents, l'équilibre n'est possible que s'ils sont situés sur la même verticale. Cet équilibre est *stable* si G′ est plus bas que G, *instable* dans le cas contraire.

90. *Troisième cas.* — Si $P' < P$, c'est-à-dire si le poids du corps est plus petit que celui du liquide déplacé, la poussée l'emporte : le corps s'élève dans le liquide, comme s'il était sollicité en sens contraire de la pesan-

teur par une force égale à P — P'. — Ce mouvement a pour effet d'amener le corps jusqu'à la surface libre du liquide, puis d'en faire émerger une portion de plus en plus grande. Mais alors la poussée qu'il éprouve diminue graduellement, et finit par devenir égale au poids du corps : l'équilibre s'établit en effet de nouveau, après quelques oscillations.

Nous arrivons ainsi à une conséquence très-importante du principe d'Archimède, conséquence que nous aurons occasion d'appliquer fréquemment :

Toutes les fois qu'un corps flotte à la surface d'un liquide, son poids est égal à celui du liquide que déplace la portion plongée.

91. **Ludion.** — On trouve une réalisation de ces divers cas dans le petit appareil qu'on nomme le *ludion*.

C'est une figurine d'émail (*fig.* 73), qu'on suspend au-dessous d'une boule de verre B creuse et percée d'un petit trou vers sa partie inférieure. Le tout est plongé dans une éprouvette à pied, entièrement pleine d'eau et fermée par une membrane tendue. Le ludion, moins pesant que l'eau qu'il déplace, se maintient au sommet de l'éprouvette ; mais si l'on vient à exercer avec le doigt une pression sur la membrane, l'eau pénètre dans la boule de verre, en comprimant l'air qui s'y trouve ; le poids de la boule augmente alors de celui de l'eau introduite, et l'on arrive sans peine à faire descendre le ludion jusqu'au fond de l'éprouvette. — Si, pendant qu'il descend, on diminue convenablement la pression, on réussit à le maintenir immobile à telle hauteur qu'on veut ; le poids total du petit appareil et de l'eau qu'il contient est alors égal à celui de l'eau déplacée.

Fig. 73. — Ludion.

— Diminue-t-on encore la pression, un peu d'eau sort de la boule, à cause de la force élastique de l'air intérieur, et la figurine remonte ; augmente-t-on de nouveau la pression, une nouvelle quantité d'eau pénètre par l'ouverture de la boule, et le ludion redescend.

92. **Détermination expérimentale des volumes des corps solides.** — Le principe d'Archimède fournit un moyen facile de déterminer, par expérience, le volume des corps solides de forme irrégulière.

Fig. 74.

Suspendons un semblable corps M (*fig.* 74), par un fil de platine très-fin, sous l'un des plateaux B d'une balance hydrostatique, et établissons

l'équilibre au moyen d'une tare placée dans l'autre plateau A ; plongeons ensuite le corps dans un vase V plein d'eau, et, l'équilibre étant alors détruit, rétablissons-le au moyen de poids marqués, placés dans le plateau B. La partie plongée du fil ayant un volume négligeable, ces poids exprimeront le poids de l'eau déplacée par le corps (87), et cela, avec l'exactitude de la double pesée (64). Supposons qu'on ait dû placer 30 grammes sur le plateau B : le gramme étant le poids d'un centimètre cube d'eau, le corps aura déplacé 30 centimètres cubes de ce liquide : il aura donc lui-même un volume de 30 centimètres cubes (*).

III. — CAPILLARITÉ.

93. **Phénomènes capillaires.** — On désigne sous le nom de *phénomènes capillaires* certains phénomènes qui paraissent être en opposition avec les lois de l'équilibre des liquides, et qu'on observe surtout dans les tubes étroits dont le diamètre est, jusqu'à un certain point, comparable à celui d'un cheveu : de là, la dénomination générale sous laquelle on les comprend.

Lorsqu'on plonge partiellement un tube de verre AB (*fig.* 75), bien nettoyé et d'un diamètre suffisamment petit, dans l'eau ou dans un liquide quelconque *capable de mouiller le verre*, on voit le liquide s'élever dans

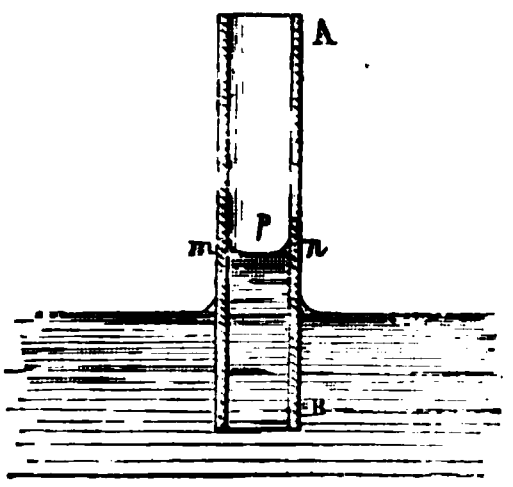


Fig. 75.

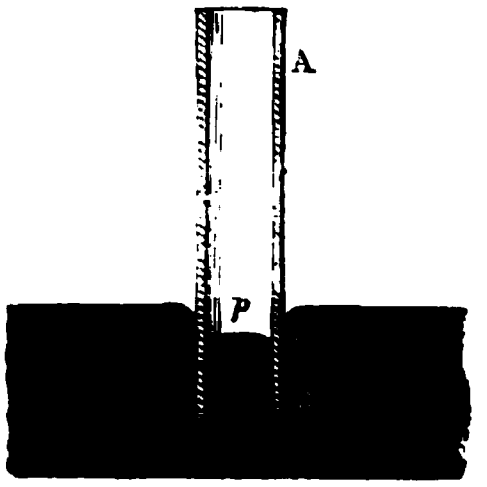


Fig. 76.

ce tube plus haut qu'à l'extérieur. La surface terminale *mpn* dans le tube capillaire est alors un *ménisque concave*.

Si l'on fait la même expérience avec du mercure ou tout autre liquide *qui ne mouille pas* le verre, ce liquide est au contraire déprimé à l'intérieur du tube au-dessous du niveau extérieur (*fig.* 76) et se termine par un *ménisque convexe*.

(*) D'après la définition même du gramme, cette conclusion n'est rigoureuse que si la température de l'eau employée est 4 degrés ; si, en effet, on exécute cette expérience avec de l'eau à des températures notablement différentes, on trouve dans les résultats des différences appréciables. Nous verrons plus loin que la détermination du volume peut cependant s'effectuer avec de l'eau à une température quelconque, pourvu qu'on connaisse cette température.

On remarque en outre, dans le premier cas, que le liquide se relève au contact des parois extérieures du tube ; dans le second, qu'il se déprime dans le voisinage de ces parois.

Newton a indiqué les considérations qui permettent de faire disparaître le désaccord apparent entre les phénomènes capillaires et les lois de l'hydrostatique. Laplace en a donné une théorie mathématique dont les conséquences ont été vérifiées par divers expérimentateurs, et notamment par Gay-Lussac. — Nous nous bornerons à indiquer ici les principales lois expérimentales de l'ascension ou de la dépression des liquides dans les tubes capillaires.

94. Ascensions capillaires.—*Pour un même liquide, les hauteurs des colonnes soulevées dans des tubes très-étroits sont en raison inverse des diamètres de ces tubes.*

Gay-Lussac a vérifié cette loi par l'expérience suivante. Un large vase V (*fig.* 77), renfermant le liquide sur lequel on opère, repose sur un plateau de bois, muni de vis calantes qui permettent de rendre le bord du vase exactement horizontal. Dans la plaque métallique AB sont assujettis des tubes capillaires, t, t', t'', de différents diamètres, où le liquide s'élève à différentes hauteurs. Les diamètres de ces tubes ont été préalablement mesurés, en pesant le mercure qui occupe dans le tube une longueur déterminée. — Pour mesurer les ascensions, on a assujetti également à la plaque AB une vis à deux pointes CC', dont la pointe inférieure C' est amenée à l'affleurement de la partie plane de la surface liquide dans le vase : la hauteur verticale de la vis tout entière a été déterminée avant l'introduction du liquide, et on mesure successivement les distances verticales de la pointe supérieure C au point le plus bas de chacun des ménisques m, m', m'' (*).

Fig. 77.

(*) Ces diverses mesures s'effectuent ordinairement à l'aide du *cathétomètre*, que nous décrirons sommairement ici, à cause du fréquent usage qu'on en fait pour mesurer la distance verticale des deux points, c'est-à-dire celle des plans horizontaux qui passent par ces points.

Le cathétomètre se compose essentiellement (*fig.* 78 et 79) d'une lunette horizontale AB, mobile le long d'une colonne verticale MN, laquelle tourne librement elle-même autour d'un axe vertical. — Les figures 78 et 79 montrent deux vues d'un même instrument, prises de deux positions opposées ; la colonne verticale MN a ici la forme d'un prisme triangulaire, qui porte une division en millimètres sur l'une de ses faces (*fig.* 79), et qui est traversé suivant son axe par une barre métallique : c'est sur cette barre que se fait la rotation, autour de la pointe de la vis R. — La lunette est portée

95. Influence de la nature des liquides. — Les expériences semblent prouver que, *pour un même liquide, l'ascension capillaire est indépen-*

sur un chariot formé de deux pièces P, Q, qui sont liées entre elles par une vis *g* (*fig.* 79) ; en *r*, cette vis n'est qu'assujettie dans une sorte de collier ; en *s*, son pas de vis tourne dans un écrou fixé à la pièce P. La pièce inférieure Q porte une vis de pression F (*fig.* 78), qui permet de la fixer solidement sur la colonne, et alors la vis *g* peut faire monter ou descendre la pièce P, de quantités aussi petites qu'on veut. A

I. R.

Fig. 78. — Cathétomètre. Fig. 79.

l'intérieur de la lunette, dans l'axe du tuyau et au *foyer* de l'objectif, c'est-à-dire au point où viennent se former nettement les images des objets extérieurs, on a tendu en croix deux fils très-fins qui forment le *réticule*. — Trois vis calantes (dont deux sont visibles en V et V') permettent de faire en sorte que le pied soit bien horizontal, et par suite la colonne bien verticale. La vis *e*, en faisant basculer la pièce *ab* autour du point O, permet d'établir l'horizontalité de l'axe de la lunette, qu'on apprécie d'ailleurs avec le niveau à bulle d'air *cd*. Avant de faire une expérience, on commence par assurer

dante de la nature du tube et de l'épaisseur de ses parois ; au contraire, *elle dépend essentiellement de la nature du liquide.* — Dans un tube de verre

toutes ces conditions, c'est-à-dire par *régler* l'instrument, opération assez délicate et dans le détail de laquelle nous n'entrerons pas.

Pour mesurer la distance verticale de deux points, on installe le cathétomètre de telle façon que ces deux points puissent être distingués nettement dans la lunette, et l'on règle l'instrument. — On place alors la lunette de manière que le point de croisement des fils du réticule vienne coïncider exactement avec l'image du premier point, pour cela, on desserre d'abord la vis de pression F, et on transporte le chariot tout entier le long de la règle, jusqu'à ce que la lunette soit arrivée à une position approchée : on fixe ensuite la pièce Q en serrant la vis F, et on tourne la vis *g* dans un sens ou dans l'autre, de manière à faire monter ou descendre la pièce P, pour achever d'établir la coïncidence. On note alors la division de la règle qui correspond à l'arête inférieure *n* d'une petite fenêtre *mn* (*fig.* 79) pratiquée dans la pièce P. — On amène de même le réticule à coïncider avec l'image du second point, en faisant d'ailleurs tourner la colonne MN sur elle-même, s'il est nécessaire, et l'on note encore la division de la règle qui correspond à l'arête *n*. — L'intervalle de ces deux divisions est évidemment égal à la distance des verticales des deux points

Il arrive souvent que l'arête *n*, dans chacune de ses positions, au lieu de correspondre exactement à l'une des divisions de la règle, tombe dans l'intervalle de deux divisions consécutives : on peut alors évaluer la fraction de millimètre qu'on doit ajouter à la première de ces divisions, au moyen d'un *vernier* tracé sur l'arête verticale de la fenêtre *mn*.

Vernier. — Imaginons deux règles (*fig.* 80), l'une AB fixe et divisée en millimètres, l'autre CD plus courte et mobile le long de la première. Supposons que la longueur de CD soit égale à celle de 9 divisions de AB, et qu'elle soit partagée en 10 parties égales, dont chacune vaut ainsi $\frac{9}{10}$ de millimètre ; cette petite règle est le *vernier*. — Soit EF (*fig.* 81) la longueur qu'on veut mesurer, à partir de l'origine de la graduation de la grande règle ; l'extrémité F tombant par exemple entre les deux traits *g* et *f*, la longueur EG est égale ici à 12 millimètres, plus une fraction additionnelle qu'il s'agit d'évaluer. Or, le zéro du vernier étant amené à l'extrémité F, comme le représente la figure, cherchons, parmi les traits du vernier, quel est celui qui se trouve en regard de l'un des traits de la règle ; supposons, par exemple, que ce soit le septième. Puisqu'une division de AD équivaut à 1 millimètre, et une division de CD à $0^{mm},9$, il est clair que la distance des traits marqués 6 et *a* est de $0^{mm},1$; celle des traits 5 et *b*, de $0^{mm},2$;... enfin, que la distance du zéro du vernier au trait *g*, est de $0^{mm},7$. En général, le numéro d'ordre de la division du *vernier* qui coïncide avec un trait de la grande règle, donne la fraction additionnelle en dixièmes de millimètre.

Fig. 80. Fig. 81.

Si, la longueur du vernier étant égale à 19 millimètres, on avait divisé cette longueur en 20 parties égales, on aurait obtenu la fraction additionnelle en vingtièmes de millimètre. De même, si le vernier était divisé en 50 parties égales, formant une longueur totale de 49 millimètres, cette fraction aurait été évaluée en cinquantièmes de millimètre. On ne peut guère dépasser cette limite, car la largeur des traits de la graduation serait alors elle-même de l'ordre de grandeur des fractions que l'on veut apprécier.

de 1 millimètre de diamètre, par exemple, on trouve que l'eau s'élève à 30mm,7; l'alcool, à 12mm,1; l'éther, à 10mm,8; le sulfure de carbone, à 10mm,2.

96. **Dépressions capillaires.**—Les dépressions capillaires sont soumises à des lois semblables.

Les expériences de vérification ont été faites principalement sur le mercure. A cause du défaut de transparence de ce liquide, Gay-Lussac amenait le tube capillaire en contact avec la paroi du vase V (*fig.* 77); il pouvait apercevoir ainsi le sommet du ménisque déprimé. Mais alors le voisinage de la paroi change nécessairement les conditions dans lesquelles se trouve placée la colonne mercurielle.

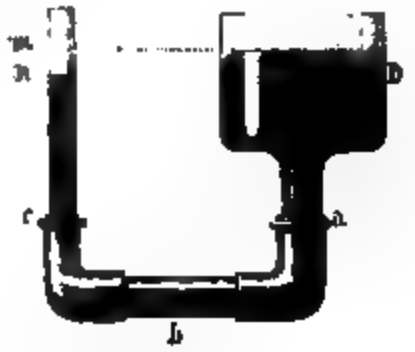


Fig. 82

Il vaut mieux, ainsi que le recommande M. Regnault, mastiquer aux deux extrémités d'un tube de fer deux fois recourbé *abc* (*fig.* 82), d'une part une large cuvette de verre D, et d'autre part le tube de verre capillaire. On détermine ensuite, au cathétomètre, la distance verticale des deux niveaux *m* et *n*.

97. **Effets divers dus à la capillarité.** — L'eau, l'alcool, l'éther, etc., s'élèvent, entre deux lames parallèles (*fig.* 83), à une hauteur d'autant plus grande que ces lames sont plus rapprochées. La théorie démontre et l'expérience vérifie que l'ascension est la moitié

Fig. 83.

Fig. 84.

de ce qu'elle serait dans un tube d'un diamètre égal à l'écartement des lames.

Si les lames de verre se touchent par un de leurs bords verticaux (*fig.* 84), le liquide s'élève, dans l'espace angulaire qu'elles comprennent,

d'autant plus haut que l'on considère des points plus voisins de l'arête de contact.

La capillarité explique l'ascension des liquides dans les canaux très-fins dont certains corps sont criblés. Un morceau de sucre ou de craie, plongé dans l'eau par une portion de sa surface, une mèche de coton qui trempe dans l'alcool ou dans l'huile, semblent pour ainsi dire aspirer le liquide, et s'en imprègnent rapidement. — La capillarité joue un rôle important dans les mouvements des liquides chez les végétaux; l'expérience a conduit M. Jamin à admettre que les forces capillaires suffisent pour expliquer les principales particularités de l'ascension de la séve.

CHAPITRE III

POIDS SPÉCIFIQUES. — ARÉOMÈTRES

I. — NOTIONS GÉNÉRALES.

98. **Définition.** — Les différents corps n'ont pas, sous le même volume, des poids égaux. Si l'on considère en particulier, l'unité de volume des divers corps, elle a, pour chacun d'eux, un poids qui doit être regardé comme l'un de ses caractères distinctifs.

On appelle poids spécifique *d'un corps le poids de l'unité de volume de ce corps.*

Remarque. — D'après cette définition, les nombres qui expriment les poids spécifiques dépendent du choix préalable des unités de poids et de volume ; or une convention particulière, fort simple avec notre système métrique, permet de déterminer la série des poids spécifiques sans avoir à énoncer les unités dont on fait usage. Cette convention consiste, en laissant l'unité de volume indéterminée, à prendre toujours pour unité de poids le poids de l'unité de volume d'eau à 4 degrés centigrades. Ainsi, au centimètre cube pris pour unité de volume, correspondra comme une unité de poids le gramme; au décimètre cube pris comme unité de volume, correspondrait comme unité de poids le kilogramme ; et ainsi de suite. — Avec cette convention, le poids spécifique de chaque corps est toujours exprimé par le même nombre, quelle que soit l'unité de volume adoptée; car, si le centimètre cube de platine pèse 23 grammes, le décimètre cube du même métal pèsera 23 kilogrammes, etc. On dira donc simplement que le poids spécifique du platine est 23 ; et les tables de poids spécifiques ainsi construites n'impliqueront pas le choix de l'unité de volume. — Enfin, dans la série des poids spécifiques ainsi déterminés, le poids spécifique de l'eau à 4 degrés est évidemment représenté par l'unité (*).

(*) Il résulte de la définition précédente que les poids spécifiques ne sont plus représentés par les mêmes valeurs absolues, dans les pays où les systèmes de poids et de

99. **Densité.** — Au terme de *poids spécifique*, on substitue fréquemment en Physique celui de *densité*. — Bien que ces expressions ne soient pas tout à fait synonymes, et que la Mécanique établisse entre elles une distinction précise, on les confond souvent l'une avec l'autre; cette confusion n'ayant aucun inconvénient dans les cas où nous aurons à faire usage de ces deux termes, nous les emploierons indifféremment.

100. **Formules relatives aux poids spécifiques.** — Il résulte immédiatement de ce qui précède que, si l'on connaît le nombre d'unités de poids que pèse un corps et le nombre d'unités de volume qu'il comprend, il suffit, pour avoir le poids spécifique, de diviser le premier nombre par le second. — Si, par exemple, on sait que 5 centimètres cubes de platine pèsent 115 grammes, le poids de 1 centimètre cube est $\frac{115}{5}$ ou 23 grammes, c'est-à-dire que le poids spécifique du platine est 23.

En général, si P et V sont des *nombres* qui expriment respectivement le poids et le volume d'un corps, *en unités correspondantes*, le poids spécifique D peut se représenter par la formule :

$$(1) \qquad D = \frac{P}{V}.$$

Enfin, avec la convention précédente, le nombre V qui exprime le volume d'un corps est le même que le nombre p qui exprime le poids d'un égal volume d'eau. La formule (1) se transforme alors en la suivante :

$$(2) \qquad D = \frac{P}{p};$$

de là, une nouvelle définition, tout à fait équivalente à la première :

Le poids spécifique d'un corps est le rapport du poids de ce corps au poids d'un égal volume d'eau.

101. **Applications des poids spécifiques.** — Avant de donner les méthodes expérimentales qui servent à déterminer les poids spécifiques, nous indiquerons les principaux usages de ces quantités.

De la formule (1), on tire immédiatement :

$$P = V \times D.$$

Le poids d'un corps peut donc être obtenu, sans une pesée directe, en multipliant sa densité par le nombre qui exprime son volume; le nombre

mesures ne présentent pas la même correspondance que notre système français. — Mais quelles que soient les unités adoptées, les rapports entre les poids d'un certain volume des divers corps sont égaux aux rapports entre les poids d'un autre volume des mêmes corps. Par suite, les rapports de tous les poids spécifiques à l'un d'eux, à celui de l'eau par exemple, ou les poids spécifiques *relatifs* son constants dans tous les systèmes. Or, d'après ce qui précède, ce sont précisément ces rapports que contiennent nos tables de poids spécifiques; ces tables donnent donc les *poids spécifiques relatifs*, pour tous les systèmes de poids et de mesures.

P est lui-même exprimé au moyen d'une unité correspondante à l'unité de volume qui a servi à évaluer V. — Ainsi, la densité d'un marbre étant 2,84, un bloc de marbre de 800 décimètres cubes pèse, en kilogrammes, $800 \times 2{,}84$, c'est-à-dire 2272 kilogrammes.

De la même formule, on tire encore :

$$V = \frac{P}{D},$$

relation qui permet d'obtenir le volume d'un corps dont on connaîtrait le poids et la densité.

II. — DÉTERMINATION DES POIDS SPÉCIFIQUES DES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES.

102. Principe des méthodes suivantes. — Nous traiterons uniquement, dans ce chapitre, de la détermination des poids spécifiques des corps *solides* et *liquides*. La même question sera résolue plus loin pour les corps gazeux (livre II, chapitre IV).

Trois méthodes principales ont été mises en usage ; toutes trois comprennent deux opérations destinées, la première à obtenir le poids P du corps soumis à l'expérience, la seconde à déterminer le poids p du même volume d'eau ; elles ne diffèrent entre elles que par le procédé employé pour connaître ces deux quantités, et chacune d'elles s'applique, avec très peu de modifications, aux corps solides et aux corps liquides.

103. Méthode de la balance hydrostatique. — Nous avons déjà montré comment la balance permet de déterminer 1° le poids d'un corps, 2° le poids du volume d'eau qu'il déplace. La méthode de la balance hydrostatique n'est que la réunion des deux opérations. — Nous l'exposerons cependant, en peu de mots, dans son ensemble.

Corps solides. — Pour déterminer la densité d'un corps *solide*, *insoluble dans l'eau*, d'un fragment de bronze, par exemple, on l'accroche à un fil métallique fin, suspendu à l'un des plateaux B de la balance (*fig.* 85), et on lui fait équilibre avec une tare placée dans le plateau A ; on enlève le corps, et l'on rétablit l'équilibre en plaçant des poids marqués dans le plateau B : on connaît ainsi le poids P du corps, par la méthode même de la double pesée (64). Après avoir enlevé les poids marqués, on accroche de nouveau le corps sous le plateau, et on le descend dans l'eau ; l'équilibre étant détruit, on le rétablit en plaçant des poids marqués dans le

Fig. 85.

plateau B, et l'on connaît ainsi le poids p de l'eau déplacée, indépendamment de la justesse de la balance (*). — On divise P par p, et le quotient est le poids spécifique cherché.

Corps liquides. — Pour déterminer la densité d'un corps liquide, d'un alcool, par exemple, on suspend par un fil fin, à l'un des plateaux B de la balance, un corps solide inattaquable par ce liquide et par l'eau, par exemple une boule de verre convenablement lestée, et on lui fait équilibre avec une tare placée dans le plateau A. On plonge alors la boule dans l'alcool, et, pour rétablir l'équilibre, on place dans le plateau B des poids marqués qui indiquent le poids P de l'alcool déplacé. En plongeant de même la boule dans l'eau pure, on connaît, par les poids qu'il faut mettre dans le plateau B pour rétablir l'équilibre, le poids p du même volume d'eau. En divisant P par p, on a donc la densité du liquide.

La méthode précédente, la seule applicable aux corps solides un peu volumineux, ne donne jamais des résultats bien précis, à cause de la résistance qu'oppose le liquide aux mouvements des corps qui y sont plongés.

104. Méthode du flacon.—La méthode du flacon est, de beaucoup, la meilleure qu'on puisse employer : c'est la seule qui soit susceptible de fournir avec une égale précision les deux poids dont le rapport donne la densité.

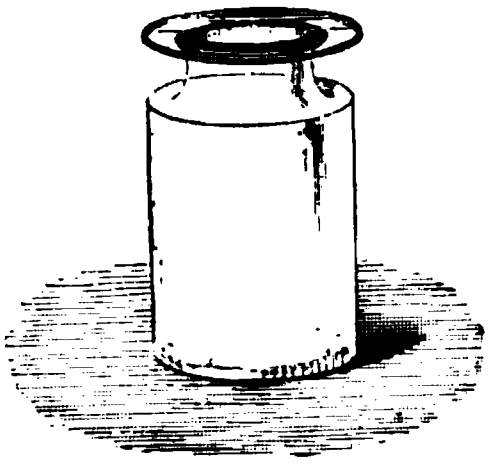


Fig. 86.

Corps solides. — Les flacons destinés à déterminer la densité des corps solides sont de formes diverses : lorsqu'on veut opérer sur des fragments assez volumineux, on se sert de petits flacons à large goulot (*fig.* 86), dont le bord a été usé à l'émeri, de façon qu'un disque de verre bien plan puisse s'y appliquer exactement ; lorsque le flacon a été rempli d'eau, on fait glisser doucement le disque sur le bord, afin de chasser tout le liquide qui pourrait le dépasser en prenant une forme convexe.

Pour obtenir la densité d'un corps solide insoluble dans l'eau, d'un fragment de marbre par exemple, on le met dans un plateau B de la balance, et l'on place à côté le flacon rempli d'eau et bouché : on équilibre avec une tare placée dans le plateau A ; on enlève alors le corps, et on le remplace par des poids marqués, ce qui donne son poids P par double pesée. On retire ensuite les poids marqués et l'on introduit le fragment de marbre dans le flacon ; il sort une certaine quantité de liquide ; on re-

(*) Dans les expériences précises, les données de l'expérience doivent subir des corrections, dans lesquelles on tiendra compte de la poussée de l'air et de la température. Ces corrections seront indiquées plus loin, comme applications des lois de dilatation.

place le disque de verre, on essuie le flacon avec soin, et on le remet dans le plateau B. Il est clair que l'équilibre ne peut subsister, puisque le corps a chassé un volume d'eau égal au sien : les poids marqués qu'on doit ajouter en B représentent le poids de cette eau, c'est-à-dire *p*. Le quotient P par *p* est la densité du marbre.

Lorsqu'on doit opérer sur un corps en poudre, sur une poudre métallique par exemple, on emploie de petits flacons à goulot étroit (*fig.* 87), dont le bouchon *ab* est formé d'un tube effilé et ouvert, usé à l'émeri en *b* de façon qu'il s'enfonce d'une quantité toujours égale : lorsqu'on a rempli d'eau le petit flacon et qu'on introduit le bouchon, il sort une certaine quantité de liquide par l'ouverture *a*, et comme la surface libre de l'eau a un diamètre très-petit, il n'importe pas qu'elle soit plane ou un peu courbe. — On opère absolument comme avec le flacon précédent : il faut remarquer seulement que la poudre peut, lorsqu'on l'introduit dans l'eau, entraîner avec elle des bulles d'air qui se dégagent toujours difficilement : il suffit le plus souvent, pour les chasser, de placer le flacon sous le récipient de la machine pneumatique, et de le laisser quelques instants dans le vide.

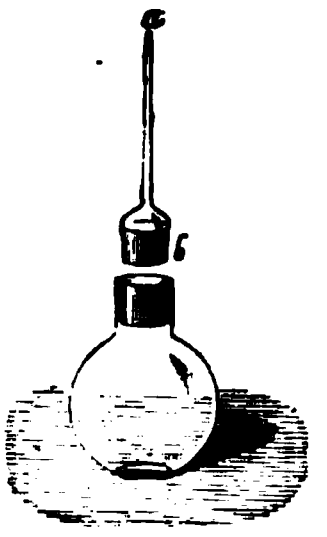


Fig. 87.

Corps liquides. — On se sert ordinairement, pour les liquides, de petits flacons d'une forme un peu différente de celle qui précède : l'usage en a été introduit par M. Regnault. Ils sont formés d'un réservoir cylindrique ou sphérique A (*fig.* 88 ou 89), surmonté d'un tube capillaire et d'une autre partie cylindrique B qui sert d'entonnoir ; un bouchon de verre P empêche l'évaporation des liquides volatils pendant les pesées. Lorsqu'on les a emplis d'un liquide (*), on enlève, avec un petit rouleau de papier buvard, tout ce qui dépasse un trait *a* marqué sur le tube.

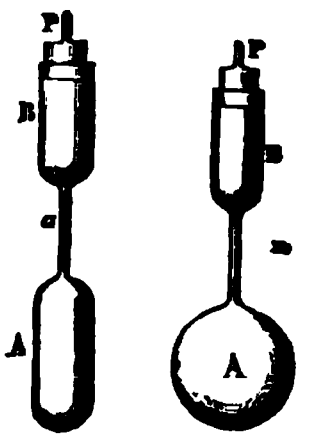


Fig. 88. Fig. 89.

Pour obtenir la densité, on place le flacon plein de liquide dans le plateau B de la balance, et l'on établit l'équilibre avec une tare dans l'autre plateau A; puis on vide le flacon, on le sèche avec soin et on le replace dans le plateau B ; les poids marqués qu'il faut ajouter pour rétablir l'équilibre font connaître le poids P du liquide par double pesée. La même opération, faite avec de l'eau, donne le poids *p* d'un égal volume d'eau. Il suffit de diviser P par *p* pour avoir la densité.

105. **Méthode des aéromètres à volume constant.** — On nomme *aréomètres à volume constant* des appareils flotteurs, qui sont par eux-

(*) Le tube *a* étant capillaire, il faut, pour y introduire le liquide, employer une méthode particulière, semblable à celle qui sera indiquée plus loin pour la construction du thermomètre.

mêmes assez légers pour ne s'enfoncer qu'incomplétement dans les liquides où on les place, mais qu'on peut charger de façon à faire toujours plonger la même portion de leur volume. Ils n'offrent entre eux que de légères différences, selon qu'ils sont destinés à la détermination des densités des corps solides ou des liquides.

Corps solides. — L'aréomètre le plus employé pour déterminer la densité des corps solides est celui de Nicholson (*fig.* 90). Le corps de l'instrument est en métal et creux; il se compose d'une portion cylindrique A, terminée en haut et en bas par deux cônes : le cône supérieur supporte une tige métallique et un plateau B; le cône inférieur porte un petit crochet, auquel on peut suspendre une corbeille C contenant, sous un double fond, de la grenaille de plomb qui sert de lest à l'appareil et le maintient vertical dans l'eau. Sur la tige supérieure est marqué un trait *a*, qu'on nomme *point d'affleurement*; c'est jusqu'à ce point que doit s'enfoncer l'appareil.

Fig. 90. — Aréomètre de Nicholson.

Pour déterminer la densité d'un corps solide, insoluble dans l'eau, d'un fragment de soufre par exemple, on met l'appareil dans l'eau, et on place le corps sur le plateau supérieur B; on ajoute de la grenaille de plomb de telle sorte que l'instrument s'enfonce jusqu'au point d'affleurement, puis on enlève le corps et on le remplace par des poids marqués, capables de produire de nouveau l'affleurement; on connaît ainsi le poids P du corps par double pesée, comme on l'obtiendrait avec une balance ordinaire. On retire alors ces poids, et on place le morceau de soufre sur la corbeille C; le corps, étant plongé dans l'eau, éprouve une poussée, en sorte que, pour rétablir l'affleurement, il faut placer des poids marqués sur le plateau B; ils expriment le poids p d'un volume d'eau égal à celui du soufre. Le quotient de P par p est la densité cherchée.

Cette méthode, qui n'exige pas, comme les deux autres, l'emploi d'une balance, est surtout employée par les minéralogistes pour obtenir des densités approximatives. L'instrument est commode en ce qu'il est très-portatif; on l'enferme dans un étui de laiton ou de fer-blanc, qui peut tenir lieu, en voyage, de l'éprouvette dans laquelle on fait flotter l'aréomètre. La principale imperfection du procédé est le défaut de sensibilité, dû à l'adhérence de l'eau pour le métal.

Lorsqu'on opère sur des corps dont la densité est moindre que celle de l'eau, la poussée de ce liquide tendrait à les faire remonter à la surface;

il suffit alors de retourner la corbeille, et de l'accrocher au cône inférieur par le petit anneau métallique *b;* la poussée de l'eau presse le corps dans la concavité de la corbeille, et la méthode s'applique sans autre modification.

Corps liquides. — On emploie, pour déterminer les densités des liquides, un instrument de forme analogue, l'aréomètre de Fahrenheit (*fig.* 91); il est en verre, afin qu'il ne soit pas attaqué par les liquides, et porte, au lieu de la corbeille inférieure qui devient inutile, une boule de verre contenant du mercure qui forme le lest.

Pour obtenir la densité d'un liquide, d'un acide sulfurique du commerce, par exemple, on pèse d'abord l'instrument; soit 40 grammes son poids, qu'on pourra noter pour n'avoir pas à le déterminer de nouveau à chaque expérience. On le plonge dans l'acide sulfurique, et on ajoute des poids marqués pour le faire enfoncer jusqu'au point d'affleurement : puisque l'instrument flotte, la poussée qu'il éprouve de la part de l'acide est égal à son poids total (90), c'est-à-dire à la somme de 40 grammes et des poids placés dans le plateau; cette somme exprime donc le poids P d'un volume d'acide sulfurique égal au volume de la partie immergée. On le plonge de même dans l'eau; la somme de 40 grammes et des poids qui déterminent l'affleurement exprime le poids p d'un égal volume d'eau. Le quotient de P par p est la densité du liquide. — Cette méthode a ici les mêmes avantages et les mêmes inconvénients que pour les corps solides.

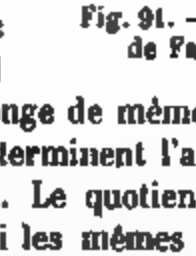


Fig. 91. — Aréomètre de Fahrenheit.

106. Corps solides solubles dans l'eau. — Aucune des méthodes précédentes n'est immédiatement applicable aux corps solides qui sont solubles dans l'eau. Mais, pour déterminer la densité de l'un de ces corps, on peut généralement trouver un liquide dans lequel il ne soit pas soluble; supposons que l'essence de térébenthine remplisse cette condition. On opère avec ce liquide comme nous l'avons fait avec l'eau, ce qui donne la densite du corps *par rapport à l'essence :* il est facile de voir qu'il suffit de multiplier ensuite ce nombre par la densité de l'essence par rapport à l'eau. — En effet, soit P le poids du corps, p le poids d'un même volume d'eau, et p' le poids du même volume d'essence : la première opération aura donné la valeur de $\frac{P}{p'}$, or, multiplier cette valeur par la densité de l'essence, c'est la multiplier par $\frac{p'}{p}$, ce qui donne

$\frac{P}{p'} \times \frac{p'}{p}$, ou $\frac{P}{p}$, c'est-à-dire la densité du corps par rapport à l'eau.

107. **Résultats.** — Les tables suivantes donnent les poids spécifiques des principaux corps solides et liquides. — On pourra remarquer que, pour un même corps solide, la densité varie, dans certaines circonstances, entre des limites assez étendues : ainsi, pour la plupart des métaux, le cuivre et le platine par exemple, le poids spécifique diffère selon qu'ils ont été fondus ou soumis à des actions mécaniques. — Le carbone présente aussi des poids spécifiques différents, suivant qu'on le considère à l'état de diamant ou à l'état de graphite. Cette particularité, que l'on retrouve dans le soufre, le phosphore, et dans un grand nombre d'autres corps, paraît tenir à des différences dans le mode de groupement des molécules.

POIDS SPÉCIFIQUES DES PRINCIPAUX CORPS SOLIDES (*).

Acier trempé	7,82	Iode	4,95
Aluminium fondu	2,56	Iridium fondu	21,15
Anthracite	1,40	Ivoire	1,92
Antimoine	6,72	Jayet	1,31
Argent fondu	10,47	Laiton	8,43
Arsenic	5,75	Liége	0,24
Bismuth fondu	9,82	Lithium	0,59
Bois de cèdre	0,56	Magnésium	1,74
— de cyprès	0,66	Manganèse	8,01
— de hêtre	0,85	Marbre statuaire	2,71
— d'orme	0,55	Molybdène	8,60
— de peuplier ordinaire	0,39	Nikel fondu	8,28
— de pommier	0,73	Or fondu	19,26
— de sapin jaune	0,66	— forgé	19,36
— de tilleul	0,60	Palladium fondu	11,30
Bore cristalisé	2,68	Perles	2,75
Cadmium écroui	8,69	Phosphore ordinaire	1,84
Calcium	1,58	— rouge	2,10
Chrome	5,90	Platine fondu	21,15
Cobalt fondu	7,81	— écroui	23,00
Corail	2,69	Plomb	11,35
Cristal de roche	2,65	Porcelaine de Chine	2,38
Cuivre fondu	8,85	— de Sèvres	2,24
— laminé	8,95	Potassium	0,87
Diamant du Brésil	3,52	Sélénium	4,30
Émeraude verte	2,69	Silicium cristallisé	2,49
Étain	7,29	Sodium	0,97
Fer	7,79	Soufre natif ou octaédrique	2,07
Flint-glass, de Guinand	3,59	— prismatique	1,97
Fonte de fer	7,21	Strontium	2,54
Glace	0,92	Succin	1,08
Glucinium	2,10	Tellure	6,24
Graphite	2,16	Tungstène	17,60
Gypse	2,33	Verre à vitres	2,55
Houille compacte	1,33	Zinc	7,19

(*) Les nombres contenus dans ces tables ont été empruntés, pour la plupart, à l'Annuaire publié par le bureau des Longitudes.

POIDS SPÉCIFIQUES DE QUELQUES LIQUIDES.

Acide nitrique fumant. . . .	1,451	Essence de térébenthine. . .	0,869
— sulfurique concentré. .	1,841	Huile d'olive.	0,915
Alcool absolu.	0,792	Lait.	1,030
Brome.	2,966	Mercure.	13,596
Eau de mer.	1,026	Sulfure de carbone.	1,293
— distillée, à 4 degrés. . .	1,000	Vin de Bordeaux.	0,994
Esprit de bois.	0,798	— de Bourgogne.	0,991

III. — ARÉOMÈTRES A POIDS CONSTANT.

108. Usages auxquels sont destinés les aréomètres à poids constant. — Les diverses méthodes que nous venons d'exposer exigent qu'on effectue, pour déterminer la densité des liquides, une véritable expérience ; elles comprennent toujours au moins deux opérations, qui consistent chacune à chercher le nombre de grammes et de fractions de gramme nécessaires pour établir un équilibre. Chaque détermination demande donc à la fois un certain temps et une certaine habitude, ce qui est un double inconvénient dans les usages industriels. — En outre, pour les divers liquides qu'on trouve dans le commerce, ce n'est pas la densité que le fabricant ou l'acheteur a intérêt à connaître, mais plutôt le degré de concentration, c'est-à-dire la proportion d'eau mélangée ; il est vrai que l'addition successive de l'eau modifie la densité, mais elle la modifie d'une manière différente pour les divers liquides. — On a donc adopté, pour chaque liquide, un degré de concentration commercial, dont il n'est permis de s'écarter que très-peu, et qu'on cherche simplement à constater.

Le problème ainsi limité peut être résolu instantanément au moyen d'appareils flotteurs, qui diffèrent des précédents en ce que leur poids reste toujours constant : ils s'enfoncent alors de quantités variables dans les divers liquides. On leur donne le nom d'*aréomètres à poids constant*.

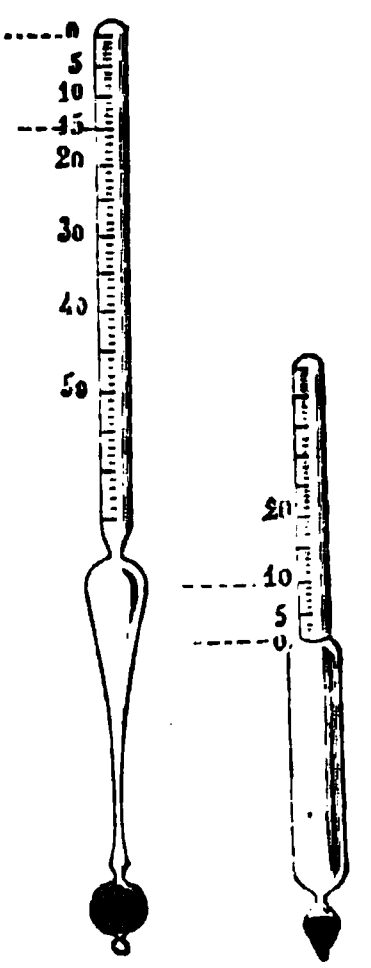


Fig. 92. Fig. 93.
Aréomètres de Baumé.

109. Aréomètres de Baumé et de Cartier. — Ceux de ces aréomètres qui sont le plus répandus sont les aréomètres de Baumé. Ils se composent tous (*fig.* 92 et 93) d'un tube de verre, qui porte à sa partie inférieure un renflement de forme variable, et une ampoule contenant du mercure ou de la grenaille de plomb comme lest. La graduation diffère, selon qu'ils doivent servir à des liquides plus denses que l'eau ou à des liquides moins denses.

Les aréomètres destinés aux liquides plus denses que l'eau sont dési-

gnés dans l'industrie sous les noms de *pèse-acides*, *pèse-sirops*, *pèse-sels*... Pour graduer l'un de ces instruments (*fig.* 92), on le plonge dans l'eau pure à la température de 12°,5, et on règle le lest de façon qu'il s'enfonce à peu près jusqu'au sommet de la tige; on marque le point d'affleurement, qui sera le zéro de la graduation. On fait ensuite une solution de 15 parties de sel marin et de 85 parties d'eau, en poids; on y plonge l'instrument, qui s'y enfonce moins que dans l'eau; on marque ce nouveau point d'affleurement, et on partage l'intervalle qui le sépare du premier en 15 parties égales : chacune d'elles est un *degré* de l'aréomètre; on continue à marquer des divisions d'égale longueur jusqu'au bas de la tige. — Lorsque l'instrument, plongé dans un acide quelconque, s'enfonce par exemple jusqu'au 54e degré, on dit que cet acide marque 54 degrés au pèse-acides de Baumé.

Les aréomètres qui doivent servir pour les liquides moins denses que l'eau sont ordinairement désignés sous le nom de *pèse-esprits*, *pèse-liqueurs* (*fig.* 93). Pour graduer l'un de ces instruments, on règle le lest de façon qu'il s'enfonce, dans l'eau pure à la température de 12°,5, jusqu'à quelques millimètres au-dessus de l'extrémité inférieure de la tige, et l on marque ce point d'affleurement. Puis on le plonge dans une solution de 10 parties en poids de sel marin et de 90 parties d'eau; on note ce second point d'affleurement, qui est situé au-dessous du premier et que l'on prend ici pour le zéro de l'instrument. On partage l'intervalle compris entre ces deux points en 10 parties égales, et on continue à marquer des divisions égales jusqu'à l'extrémité supérieure de la tige; ce sont les degrés de l'aréomètre (*).

On voit immédiatement combien ces deux graduations sont arbitraires; elles sont en outre tout à fait indépendantes l'une de l'autre, et les deux échelles n'ont pas le même zéro. — Ces instruments sont donc uniquement destinés à fournir des points de repère à l'industrie : on sait, par exemple, que l'acide sulfurique du commerce doit marquer 66 degrés au pèse-acides de Baumé; que l'éther ordinaire du commerce doit marquer au pèse-esprits 56 degrés, et qu'il peut en marquer jusqu'à 65 quand on le rectifie; que l'ammoniaque doit marquer de 22 à 25 degrés, etc... Si ces liquides marquent un degré plus élevé que le degré commercial, c'est qu'ils sont plus concentrés qu'on n'est en droit de l'exiger, et on pourrait encore y ajouter de l'eau pour les vendre au prix ordinaire; s'ils marquent un degré moindre, c'est qu'ils ne sont pas assez concentrés. Mais l'instrument n'indique pas quelle est la proportion d'eau : il ne peut donc donner exactement la valeur vénale.

L'*aréomètre de Cartier* n'est qu'une modification à peu près insignifiante de celui de Baumé, imaginée sans autre motif qu'une concurrence com-

(*) Dans la plupart des cas, les pèse-liqueurs sont gradués par comparaison avec des *étalons* déjà construits : on se dispense alors de marquer les dix premiers degrés, afin de raccourcir la tige de dix divisions qui seraient inutiles dans la pratique.

merciale. Sa graduation est tout aussi arbitraire, et Cartier n'en a jamais fait connaître les bases; le 10e degré représente encore la densité de l'eau pure à la température de 12°,5; mais le 29e degré correspond au 31e de l'aréomètre de Baumé. — Cet aréomètre a été longtemps employé par la régie, à l'exclusion de tout autre instrument, pour les droits à percevoir sur les eaux-de-vie et les esprits. On tend aujourd'hui à le remplacer universellement par l'alcoomètre centésimal, dont nous allons montrer la supériorité.

110. **Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac.** — Cet instrument (*fig.* 94) est construit pour donner immédiatement la richesse en alcool des mélanges d'alcool et d'eau, pourvu qu'ils ne contiennent aucune autre matière. Il a la forme des aréomètres précédents, sa graduation a été faite à la température de 15 degrés centigrades. On l'a d'abord plongé dans de l'alcool absolu, et on a réglé le lest de façon qu'il s'enfonçât jusqu'au sommet de la tige : en ce point, on a marqué 100. Puis on a fait une solution alcoolique contenant *en volume* 95 d'alcool pour 100 ; au point d'affleurement on a marqué 95, et ainsi de suite, en opérant successivement avec des liqueurs contenant en volume 90, 85, 80, etc., d'alcool pour 100. Ces points déterminés par expérience étant très-rapprochés, on a pu, sans erreur sensible, partager en 5 parties égales l'intervalle compris entre deux points consécutifs. Si l'instrument s'enfonce jusqu'à la division 78, dans un mélange d'alcool et d'eau, ce mélange contiendra en volume 78 d'alcool pour 100. — Il est intéressant de remarquer combien sont différentes les grandeurs des divisions déterminées ainsi par expérience : les degrés qui correspondent aux mélanges très-pauvres en alcool, c'est-à-dire voisins du zéro, sont beaucoup plus petits, comme le montre la figure 94, que les degrés voisins du 100e degré.

Fig. 94.

Enfin, l'instrument ayant été gradué à la température de 15 degrés, il est clair que ses indications doivent subir des corrections, quand on veut l'employer à une autre température. Un même mélange ayant en effet des densités différentes à différentes températures, l'alcoomètre s'y enfonce de quantités variables : Gay-Lussac a donné des tables, construites empiriquement, qui permettent d'effectuer des corrections pour toutes les températures auxquelles on peut avoir à faire ces observations. Il est indispensable d'y avoir recours dans la pratique : les corrections correspondent souvent à plusieurs degrés de l'instrument.

111. **Essais des vins.** — L'alcoomètre ne peut être employé pour obtenir directement la richesse alcoolique des vins, parce que ces liquides contiennent, outre l'eau et l'alcool, diverses substances qui en modifient la densité. — On doit encore à Gay-Lussac un procédé qui consiste à transformer un vin déterminé en un liquide contenant, sous le même volume, la même quantité d'alcool, avec de l'eau pure.

Ce procédé est fondé sur cette remarque, fournie par la pratique, que, quand on distille un vin ou un esprit dont la richesse ne dépasse pas 0,15, (c'est-à-dire quand on le fait bouillir et que l'on condense le liquide vaporisé, en le faisant passer dans un tube refroidi extérieurement), l'alcool passe tout entier, avec un peu d'eau, dans le premier tiers du liquide condensé. — Voici en peu de mots les détails de ce procédé, et l'appareil construit par M. Salleron (*fig.* 95), qui est maintenant adopté par les octrois des grandes villes et par un grand nombre de commerçants. C'est l'appareil de Gay-Lussac, un peu modifié; il a l'avantage d'être portatif, et permet de faire une expérience en quelques minutes.

On met du vin dans l'éprouvette E jusqu'au trait *m*, ce qui mesure environ 35 centimètres cubes du liquide; on verse ce vin dans le ballon B, et

Fig. 95. — Essai des vins.

l'on rince l'éprouvette avec un peu d'eau, dont on emplit une fois seulement la capacité du tube *t'*, pour l'ajouter au liquide de B. On fait communiquer le ballon, au moyen d'un bouchon de caoutchouc et d'un tube *t* de même matière, avec un petit serpentin contenu dans un vase de laiton D plein d'eau froide, et on allume la lampe *l*. Au bout de quelques instants, on voit l'ébullition commencer, et l'on recueille le liquide condensé dans la même éprouvette E. Quand il a atteint le trait 1/3, on retire la lampe et l'on achève de remplir l'éprouvette jusqu'au trait *m* avec de l'eau pure. On a ainsi un liquide contenant, sous le même volume, la même quantité d'alcool que le vin à essayer : comme il ne renferme plus de substances étrangères, on peut le doser avec l'alcoomètre. Un thermomètre T donne la la température de ce liquide et permet de faire les corrections au moyen de la table de Gay-Lussac.

Quand on applique cette méthode à des vins capiteux, comme le vin de Madère, les vins d'Espagne ou du midi de la France, il est nécessaire de distiller jusqu'au trait 1/2. C'est là du reste ce qu'il faut toujours faire

quand on essaye un liquide dont on ne connaît pas *a priori* la richesse approximative ; il n'y a d'ailleurs aucun inconvénient à dépasser cette limite.

112. **Pèse-sels centésimaux.** — Lorsqu'on a besoin de déterminer fréquemment la richesse de solutions diverses d'un même sel, on peut graduer par expérience des aréomètres centésimaux pour cet usage, en se servant *de ce sel lui-même*, comme Gay-Lussac s'est servi de l'alcool pour graduer l'alcoomètre. C'est ce qu'on fait dans quelques fabriques, et c'est aussi d'après ce principe qu'on a pu construire des *pèse-vins*, des *pèse-lait*, etc. — Mais la confiance qu'on peut avoir dans ces instruments est toujours subordonnée à l'hypothèse que le liquide soumis à l'essai ne contient que de l'eau comme matière étrangère. Il est clair que d'autres substances introduites dans le liquide pourraient, en changeant la densité, conduire à des erreurs considérables.

* 113. **Volumètres.** — Un aréomètre à volume constant peut être gradué, ainsi que l'a indiqué encore Gay-Lussac, de façon à donner immédiatement, soit la densité d'un liquide, soit le volume occupé par 1 kilogramme de ce liquide ; l'une ou l'autre de ces données, d'ailleurs équivalentes, peut offrir dans l'industrie plus ou moins d'avantages selon les circonstances. L'instrument prend alors le nom de *volumètre* ou de *densimètre*.

Pour graduer un *volumètre* destiné aux liquides plus denses que l'eau, on règle le poids de l'appareil de façon qu'il s'enfonce dans l'eau pure jusqu'au haut de la tige, et l'on marque 100 au point d'affleurement. On le plonge ensuite dans un liquide dont la densité soit connue, $\frac{4}{3}$ par exemple : il s'enfonce d'une quantité moindre, et le poids du liquide déplacé étant le même dans les deux cas, les volumes plongés sont en raison inverse des densités. Si le premier volume était représenté par 1, le second devrait être représenté par $\frac{3}{4}$; le premier ayant été désigné par 100, le second doit être marqué 75. On partage l'intervalle en 25 parties égales, et l'on prolonge ces divisions jusqu'au bas de la tige.

Une méthode analogue pourrait être employée pour les volumètres destinés aux liquides moins denses que l'eau. — On préfère d'ordinaire la suivante : le lest ayant été réglé de façon que l'aréomètre plonge dans l'eau jusqu'à la naissance de la tige, et le nombre 100 ayant été marqué en ce point, on pèse l'instrument ; on y ajoute ensuite momentanément une surcharge, formée, par exemple, de fils de platine ou de plomb, et ayant un poids égal au quart du poids primitif ; le rapport du poids primitif au poids actuel est le rapport de 4 à 5, et ce rapport est aussi celui des volumes d'eau déplacés. Donc, puisqu'on a marqué 100 au premier point d'affleurement, on doit marquer 125 au second ; on partage l'intervalle en 25 parties égales et on prolonge la division jusqu'au haut de la tige.

Si, dans un liquide donné, un volumètre s'enfonce jusqu'à la division 120, c'est qu'un même poids, celui de l'instrument, représente 100 volumes d'eau et 120 volumes de ce liquide. Or 1 kilogramme représente 1 litre d'eau ; donc un kilogramme représente un 1^l, 20 de ce liquide.

* 114. **Densimètres.** — Un instrument étant gradué comme volumètre, il est facile de déterminer immédiatement les indications de cet instrument fonctionnant comme *densimètre*. — En effet, pour le liquide de ce dernier exemple, puisque 1^l,20 pèse 1 kilogramme, la densité sera $\frac{1}{1,20}$ ou $\frac{100}{120}$; elle s'obtiendra donc en divisant le nombre 100 par le degré du volumètre. — On peut construire ainsi une table donnant, pour les divisions successives du volumètre, les valeurs de ce quotient, c'est-à-dire les densités correspondantes : on peut aussi marquer ces nombres sur l'instrument lui-même, qui prend alors le nom de *densimètre*.

CHAPITRE IV

PESANTEUR DE L'AIR ET DES GAZ. — BAROMÈTRE

---

115. Extension des principes de l'hydrostatique aux corps gazeux. — Les gaz ressemblent aux liquides par l'extrême mobilité de leurs molécules ; comme les liquides, ils n'ont par eux-mêmes aucune forme déterminée et prennent toujours celle du vase qui les contient. Ils s'en distinguent par leur facile compressibilité et par leur *force élastique* (28, 29). — Aussi, tous les principes d'hydrostatique qui dépendent seulement de la mobilité des molécules, sont-ils applicables, comme on va le voir, aux gaz aussi bien qu'aux liquides.

116. Transmission des pressions dans les gaz. — Égalité de pression dans tous les sens autour d'un point. — Le principe de la *transmission des pressions*, qui est le fondement de l'hydrostatique (68), est applicable au corps gazeux.

Reprenons les deux cylindres A et B (*fig.* 44) ; mais, au lieu de les supposer pleins d'eau, imaginons qu'ils contiennent de l'air ou tout autre gaz. Admettons toujours que le piston P ayant une surface centuple de celle du piston p, on charge le premier d'un poids de 2000 kilogrammes, et le second d'un poids de 20 kilogrammes. L'équilibre s'établira entre les deux pressions, comme si l'appareil contenait un liquide, avec cette différence que chaque piston s'enfoncera d'abord d'une certaine quantité dans son cylindre, à cause de la compressibilité du gaz. — Une fois cette diminution de volume produite, la pression qui est transmise de bas en haut au piston P, par l'intermédiaire du gaz, et qui fait équilibre à un poids de 2000 kilogrammes, équivaut à 100 fois la pression exercée sur le piston p.

De ce principe on peut déduire, pour les corps gazeux comme pour les liquides, et par le même raisonnement, le principe d'*égalité de pression dans tous les sens autour d'un point* (71).

117. L'air et les gaz sont pesants. — Aristote avait soupçonné que l'air est un corps pesant : la démonstration fut donnée par Galilée, au commencement du dix-septième siècle. — On fait ordinairement, dans les cours, l'expérience suivante :

Dans un ballon de verre B (*fig.* 96), fermé par un robinet, on fait le vide à l'aide de la machine pneumatique. On le suspend sous l'un des plateaux A d'une balance, et dans l'autre plateau A′ on fait une tare. Alors on ouvre partiellement le robinet, pour laisser rentrer lentement l'air dans le ballon : dès qu'on entend le sifflement que produit le gaz en traversant l'ouverture étranglée du robinet, on voit le fléau de la balance s'incliner du côté du ballon ; l'inclinaison augmente à mesure que la quantité d'air introduite est plus considérable. De là résulte que *l'air est pesant*.

Fig. 96.

Au lieu de laisser rentrer de l'air dans le ballon, on aurait pu y introduire un gaz quelconque, en le faisant communiquer avec un réservoir renfermant le gaz : l'expérience donne toujours un résultat semblable. Donc *tous les gaz sont pesants*.

Nous expliquerons plus loin (livre II, chapitre IV) comment on peut déterminer avec exactitude le poids d'un volume déterminé d'un gaz : provisoirement, nous admettrons que le poids d'un litre d'air, sous la pression atmosphérique, est d'environ $1^{gr},3$.

118. Condition d'équilibre d'un gaz pesant. — L'air et les gaz étant pesants, il y a lieu de rechercher pour ces corps, comme nous l'avons fait pour les liquides, à quelle condition ils demeurent en équilibre lorsqu'ils ne sont soumis à aucune action autre que celle de la pesanteur.

Le raisonnement qui précède (72), applicable de tous points aux corps gazeux qui transmettent les pressions de la même manière, conduira encore à la même condition d'équilibre, à savoir que, *dans un gaz en équilibre, soumis à la seule action de la pesanteur, la pression doit être la même en tous les points d'un même plan horizontal*.

119. Pression atmosphérique. — Expérience de Torricelli. — A l'époque où Galilée prouva que l'air est pesant, on expliquait encore par une hypothèse assez singulière un grand nombre de faits qui se reproduisent journellement, notamment l'ascension de l'eau dans les tuyaux des pompes aspirantes. On admettait que *la nature a horreur du vide* ; que, partout où un vide se produit, la nature met en jeu toutes ses forces pour le combler. Vers la même époque, des fontainiers de Florence remarquèrent que les pompes ne peuvent jamais aspirer l'eau à plus de 32 pieds de hauteur (environ $10^{m},4$) ; l'horreur de la nature pour le vide

paraissait donc n'être pas absolue, ou plutôt l'ancienne hypothèse devenait insuffisante.

A Torricelli, élève de Galilée, revient l'honneur d'avoir prouvé que la cause réelle de ces phénomènes est la pression exercée par l'atmosphère sur la surface libre des liquides. Il pensa que, si cette pression est réellement capable de soutenir une colonne d'eau de $10^m,4$ de hauteur, elle devrait soutenir, de la même manière, une colonne de mercure dont la hauteur serait moindre, puisque, à volume égal, le mercure pèse plus que l'eau.

Il emplit donc de mercure un tube de verre AB (*fig.* 97), long d'à peu près 1 mètre, et fermé à l'une de ses extrémités A; puis, bouchant l'autre

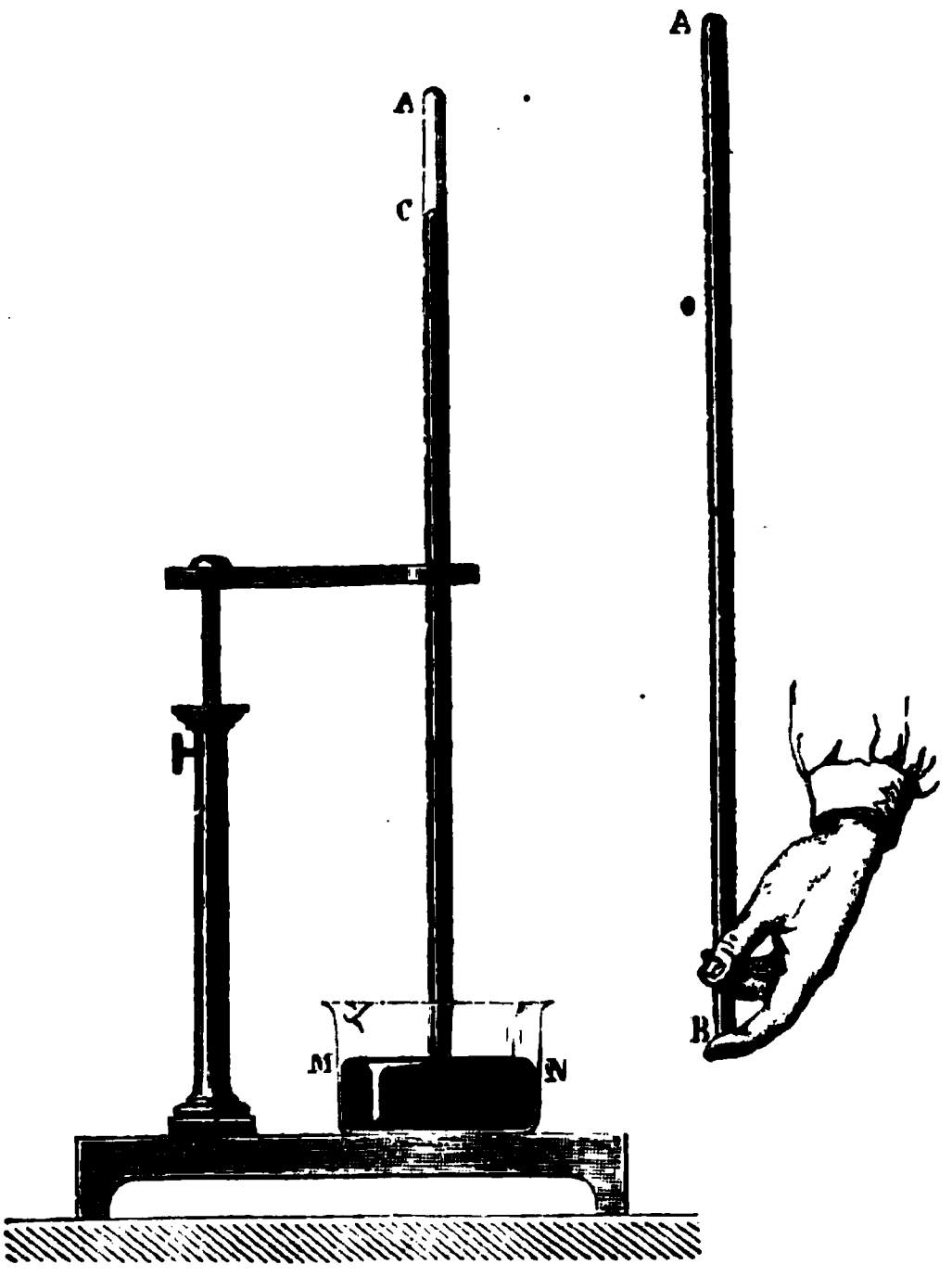


Fig. 97. — Expérience de Torricelli.

extrémité B avec le doigt, il renversa le tube et le plongea par cette extrémité dans une cuvette MN contenant du mercure; alors, en retirant le doigt, il vit la colonne de mercure conserver une hauteur de 76 centimètres environ, au-dessus de la surface libre MN du mercure dans la cuvette.

120. **Expériences de Pascal et de Périer.** — La mémorable expérience de Torricelli avait été exécutée en 1643. En 1646, Pascal la répéta en employant des tubes de diverses formes et de diverses grandeurs, qu'il emplissait de différents liquides. On cite ordinairement de lui une expérience faite à Rouen, avec du vin rouge, dans un tube de verre d'environ 15 mètres de longueur; le liquide resta soutenu dans le tube jusqu'à une hauteur d'environ 32 pieds.

En 1648, Périer, beau-frère de Pascal, sur l'invitation du célèbre géomètre, répéta l'expérience de Torricelli au sommet du Puy-de-Dôme; d'autres expérimentateurs l'exécutaient en même temps au pied de la montagne. Pascal pensait avec raison que, si la pression atmosphérique est la véritable cause de l'ascension du mercure, la hauteur de la colonne soulevée doit être d'autant moindre que l'on s'élève davantage dans l'atmosphère. C'est ce que les observations de Périer confirmèrent de la manière la plus complète.

121. **Interprétation de l'expérience de Torricelli; mesure de la pression atmosphérique.** — Revenons à l'expérience de Torricelli, et prenons, au niveau de la surface libre du mercure dans la cuvette MN (*fig.* 98), deux surfaces égales, de 1 centimètre carré par exemple, l'une *ab* à l'intérieur du tube, l'autre *a'b'* à l'extérieur. La pression *p* que l'atmosphère exerce sur *a'b'* se transmet dans tous les sens à l'intérieur du mercure (68); la couche liquide *ab* reçoit donc, de bas en haut, une pression transmise précisément égale à *p*; or, puisque cette couche est en équilibre, la pression qu'elle éprouve de bas en haut est égale à la pression qu'exerce sur elle, de haut en bas, le mercure contenu dans le tube; d'où l'on conclut que *la pression exercée par l'atmosphère sur une surface plane quelconque est égale au poids d'un cylindre de mercure ayant pour base cette surface, et pour hauteur la distance verticale des deux niveaux du mercure.*

Fig. 98.

D'après cela, pour calculer la pression de l'atmosphère sur 1 centimètre carré, il suffit de chercher le poids d'un cylindre de mercure, ayant 1 centimètre carré de base et 76 centimètres de hauteur. Le volume de ce cylindre est de 76 centimètres cubes; son poids est donc exprimé, en grammes, par le produit de la densité 13,6, par 76 (101); on trouve ainsi $1033^{gr},6$, ou $1^{kil},0336$.

122. **Évaluation de la pression atmosphérique, en hauteur de mercure.** — La hauteur de la colonne de mercure varie, comme on

vient de voir, avec la hauteur à laquelle on se trouve dans l'atmosphère ; elle varie aussi, en un même lieu, aux différents instants du jour : il en est donc de même de la pression atmosphérique. Or, si l'on rapporte toutes ces pressions à une même surface, il est clair qu'elles sont entre elles dans le même rapport que les hauteurs des colonnes de mercure qui leur font équilibre. De là vient qu'au lieu de désigner la pression atmosphérique par sa valeur en kilogrammes, on la caractérise ordinairement par la hauteur de la colonne de mercure qui lui fait équilibre. — On dit, par exemple, que, à un moment donné, *la pression est de* 75 *centimètres* ; cette locution abrégée signifie que la pression exercée sur une surface déterminée est égale au poids d'une colonne de mercure ayant pour base cette surface et pour hauteur 75 centimètres.

123. **La hauteur du mercure dans le tube de Torricelli mesure aussi la force élastique de l'air dans le lieu où l'appareil est établi.** — Considérons, une couche d'air comprise entre deux plans horizontaux peu distants AB et CD (*fig.* 99). Cette couche supporte la pression due au poids de l'atmosphère, pression qui est mesurée par la hauteur du mercure dans le tube de Torricelli, et qui s'exerce à la fois de haut en bas sur le plan AB, et de bas en haut sur le plan CD. Ces pressions tendent à rapprocher les deux plans, mais, d'autre part, en vertu de sa force élastique, le gaz fait effort pour les écarter ; si donc l'équilibre existe, c'est que la pression exercée de haut en bas sur une portion quelconque du plan AB, par le poids des couches d'air situées au-dessus de lui, est égale à la pression exercée de bas en haut sur la même surface par le gaz, en vertu de sa force élastique. Cette dernière a donc aussi pour mesure la hauteur du mercure dans le tube de Torricelli, et l'on dit, en employant une locution abrégée qui doit être interprétée comme la précédente (122), que *la force élastique de l'air est de* 75 *centimètres*.

Fig. 99.

On conçoit ainsi pourquoi la hauteur de la colonne mercurielle ne change pas, lorsqu'on transporte l'appareil de Torricelli dans une chambre dont on ferme ensuite les communications avec l'extérieur. La force élastique de l'air de cette chambre étant égale à celle de l'air extérieur, la pression qui s'exerce sur la surface du mercure dans la cuvette est égale à celle qu'exercerait l'air extérieur en vertu de son poids.

124. **Effets produits par la pression atmosphérique et par la force élastique de l'air.** — On manifeste, dans les cours, les effets de la pression atmosphérique et de la force élastique de l'air, par différentes expériences qu'il nous est maintenant facile d'expliquer.

L'expérience du *crève-vessie* (*fig.* 100) consiste à placer, sur la platine de la machine pneumatique, un cylindre de verre, ouvert à ses deux ex-

trémités, et sur l'ouverture supérieure duquel on a tendu une membrane de vessie. Tant qu'on ne fait pas fonctionner la machine, la membrane reste plane, malgré la pression énorme qu'elle supporte de la part de l'atmosphère, parce que la force élastique de l'air intérieur exerce sur elle une pression égale de bas en haut; mais, dès les premiers coups de

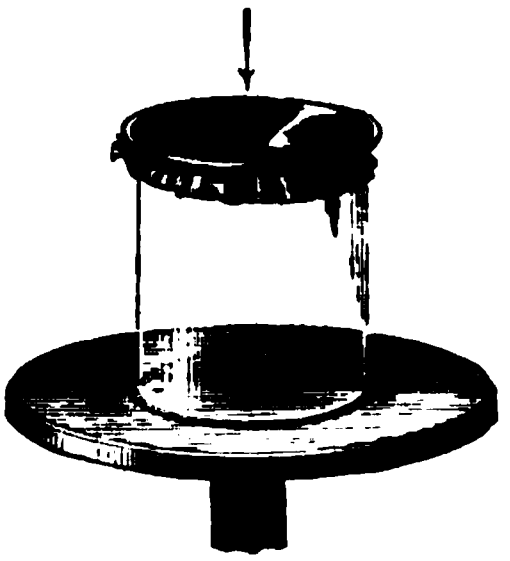


Fig. 100. — Crève-vessie.

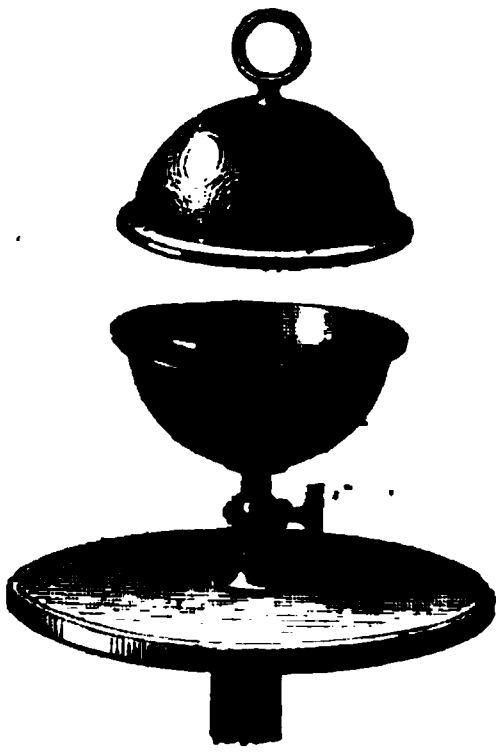


Fig. 101. — Hémisphères de Magdebourg.

piston qui diminuent cette force élastique, la membrane s'infléchit, et bientôt elle se brise sous l'effort de la pression atmosphérique, avec un bruit qui est dû surtout à la brusque rentrée de l'air dans l'espace vide.

Les *hémisphères de Magdebourg* (*fig.* 101) sont deux hémisphères de laiton creux, pouvant s'adapter exactement l'un sur l'autre; une petite bande de cuir graissé, placée entre les deux bords, rend d'ailleurs le contact plus intime. Les hémisphères étant superposés, on les fixe sur le conduit de la machine pneumatique, au moyen d'un pas de vis pratiqué dans la monture à robinet que porte l'hémisphère inférieur. Alors, le robinet étant ouvert, on fait le vide; on ferme ensuite ce robinet, et l'on détache l'appareil de la machine pneumatique. La pression atmosphérique, qui n'est plus équilibrée par la force élastique de l'air intérieur, et qui s'exerce normalement à chaque élément de la surface extérieure des hémisphères, maintient ceux-ci appliqués l'un contre l'autre, et cela si fortement que deux personnes tirant en sens opposé ne peuvent parvenir à les séparer. Au contraire, dès qu'on ouvre le robinet, on entend un sifflement qui annonce la rentrée de l'air, et l'on peut alors séparer les hémisphères sans difficulté. — Dans une expérience célèbre, exécutée à Magdebourg par le bourgmestre Otto de Guericke, qui venait d'inventer la machine pneumatique, vingt chevaux ne purent parvenir à séparer deux hémisphères d'un diamètre assez considérable, dans l'intérieur desquels on avait fait le vide.

Si l'on emplit d'eau, à plein bord, un verre à boire ordinaire, et que sur

la surface du liquide on applique une feuille de papier, on peut, en agissant avec précaution, retourner entièrement le verre sans que le liquide s'en échappe (*fig.* 102). La pression atmosphérique s'exerce donc aussi de bas en haut. — Il est bon de remarquer que la feuille de papier sert ici seulement à empêcher que la masse liquide ne se laisse diviser par le passage de l'air, qui est spécifiquement plus léger. Si, au lieu d'un verre ordinaire, on employait un tube étroit, fermé à l'une de ses extrémités, on pourrait, après l'avoir empli d'eau, le retourner purement et simplement sans que le liquide s'échappât.

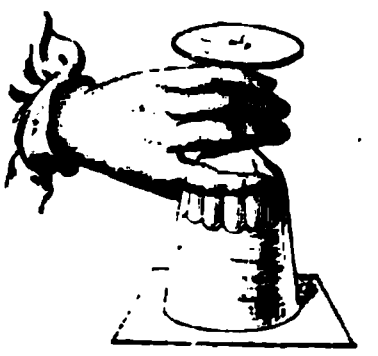


Fig. 102.

125. **Effets de la pression atmosphérique sur nos organes.** — Les principes qui précèdent permettent de concevoir comment la pression de l'atmosphère n'a pas d'effet sensible sur nos organes, bien que cette pression ait une valeur d'environ 103 kilogrammes par décimètre carré (121). Toutes les cavités de l'organisme sont occupées, ou par des liquides, ou par des gaz dont la force élastique acquiert une valeur égale à la pression atmosphérique : les deux faces de chaque paroi de ces cavités sont donc soumises à des pressions égales et contraires. De là résulte que, tant que la pression atmosphérique n'éprouve que des oscillations peu considérables, la flexibilité des parois produit seulement de petites variations dans le volume des gaz intérieurs, variations dont nous n'avons généralement pas conscience.

Il n'en est plus de même quand la pression atmosphérique vient à diminuer beaucoup ; ainsi, tous les aéronautes qui ont atteint des hauteurs considérables dans l'atmosphère s'accordent à constater un état de gêne, qui va en augmentant rapidement à mesure que la pression extérieure diminue. Cet état est certainement dû à la pression produite sur les parois intérieures de toutes les cavités de l'organisme, par les gaz que ces cavités contiennent et qui, ne pouvant plus augmenter librement de volume, exercent un effort sur les parois distendues. — C'est là un effet dont la cause est analogue à celle qui produit la distension de la vessie dans l'expérience représentée par la figure 12.

126. **Baromètre à cuvette.** — L'appareil de Torricelli, monté avec les précautions convenables et disposé de manière à permettre de mesurer exactement la hauteur du mercure soulevé, devient un instrument propre à évaluer, à chaque instant, la pression atmosphérique. Il prend alors le nom de *baromètre à cuvette*.

Pour que les indications de cet instrument soient exactes, il faut qu'à la partie supérieure du tube, dans la *chambre barométrique*, il n'existe aucun gaz ni aucune vapeur, dont la force élastique puisse déprimer la colonne mercurielle. — Après s'être procuré du mercure bien pur (*) on fait choix

(*) Le mercure récemment expédié de la mine est en général tout à fait pur. Celui qui a déjà servi dans les laboratoires contient souvent un peu d'oxyde, et des traces

d'un tube d'environ 85 centimètres de longueur (*fig.* 105); on le ferme à l'une de ses extrémités A et l'on soude une boule B à l'autre extrémité. On emplit ce tube de mercure, puis on le couche sur une grille de tôle inclinée; on place sur cette grille des charbons ardents, de manière à faire

Fig. 105.

bouillir successivement et avec précaution toutes les parties de la colonne. Dans cette opération, l'humidité et les bulles d'air qui étaient restées adhérentes aux parois du tube sont chassées : la boule B sert à empêcher la projection du mercure pendant l'ébullition. Lorsque la surface du métal paraît, dans toutes ses parties, continue et brillante, on enlève peu à peu les charbons et on laisse refroidir; on détache ensuite la boule, on bouche avec le doigt l'extrémité ouverte, et on installe le tube dans la cuvette.—On reconnaît que le tube a été bien purgé d'air et d'humidité, en l'inclinant jusqu'à ce que le mercure en atteigne le sommet : si la chambre barométrique s'emplit entièrement, et si le liquide produit en frappant le sommet du tube un bruit sec et métallique, on peut admettre que l'appareil a été établi dans des conditions satisfaisantes.

Dans les baromètres à cuvette destinés à nos appartements, la cuvette et le tube sont fixés contre une planchette de bois : une graduation en centimètres et millimètres sert à mesurer la hauteur du mercure. On ne trace ordinairement que la partie supérieure de cette graduation, dans la région où se meut le sommet de la colonne, mais le zéro est supposé au niveau du liquide dans la cuvette.

Dans ces baromètres, on suppose que le niveau du mercure dans la cuvette demeure invariable. Il n'en est pas ainsi en réalité, car chaque fois que la colonne monte dans le tube, le niveau s'abaisse dans la cuvette, et récipro-

de métaux étrangers : on le débarrasse de ces impuretés en l'agitant à plusieurs reprises avec de l'acide azotique, lavant ensuite à grande eau, puis séchant avec du papier buvard, et filtrant à travers des entonnoirs de verre effilés.)

quement; ce niveau cesse alors de correspondre au zéro de la graduation. Cet inconvénient a peu d'importance, quand il ne s'agit pas de déterminations précises; il peut d'ailleurs être beaucoup atténué en donnant à la cuvette une large surface. — A cet effet, et pour ne pas trop augmenter la masse du liquide, on adopte, pour les baromètres d'appartements, la forme de cuvette représentée par la figure 104. Cette cuvette est fermée par une peau de chamois qui donne passage à l'air, tout en empêchant la poussière de pénétrer.

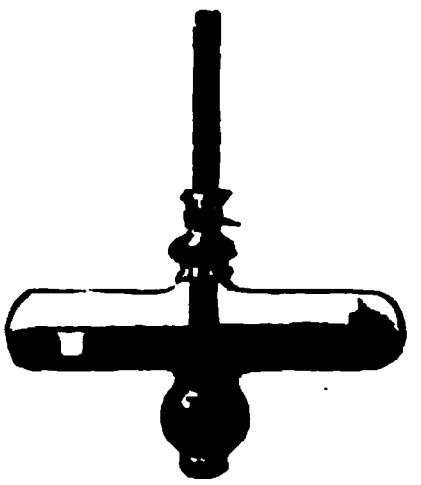


Fig. 104.

127. **Baromètre de Fortin.** — La disposition précédente est loin de comporter toute la précision que réclament les recherches exactes; on doit à Fortin un baromètre à cuvette (*fig.* 105), qui offre le double avantage de fournir des indications très-précises, et d'être facilement transportable d'un lieu dans un autre.

La cuvette du baromètre de Fortin est représentée en coupe par la figure 106. Elle se compose d'un cylindre de verre RR, fixé à sa partie supérieure dans une monture métallique NN qui est garnie de bois à l'intérieur et donne passage au tube T; ce cylindre est assujetti à sa partie inférieure dans un autre cylindre BB, en bois de buis, qui est fermé par un sac de peau de chamois PP. Le cylindre de buis et le sac sont entourés d'un étui de laiton MM, relié à la monture supérieure par des tringles métalliques. Le fond de cet étui est traversé par une vis V, dont l'extrémité s'appuie contre un disque de bois D fixé à la peau de chamois; en tournant la vis dans un sens ou dans l'autre, on peut faire monter ou descendre le niveau du mercure dans la cuvette. — La monture supérieure N est traversée par une pointe d'ivoire; c'est à l'extrémité *a* de cette pointe que l'on amène le niveau *mn* du mercure à chaque observation, en faisant mouvoir la vis. On reconnaît que le contact est établi, lorsque la pointe semble toucher son image, vue par réflexion dans le mercure. — La communication entre l'air extérieur et l'intérieur de la cuvette se fait par une très-petite ouverture, ménagée près du point d'insertion de la pointe d'ivoire.

La graduation part de l'extrémité inférieure de la pointe *a;* elle est tracée sur un tube de laiton qui entoure le tube de verre dans toute sa longueur (*fig.* 105). Deux fentes longitudinales opposées l'une à l'autre permettent d'apercevoir le sommet de la colonne de mercure. L'instrument est supporté par un trépied; une suspension particulière, dite *suspension de Cardan,* lui permet de se mouvoir librement, et de prendre de lui-même une position rigoureusement verticale. — Quand le baromètre doit être transporté, on soulève le fond mobile de la cuvette à l'aide de la vis V, jusqu'à ce que le mercure remplisse d'une manière complète et la cuvette et le tube; on le place ensuite dans un étui, qui peut contenir aussi le trépied démonté.

Pour mesurer avec exactitude la hauteur de la colonne mercurielle, on se sert du curseur C, représenté à part dans la figure 107 : on peut, en le

107

Fig. 105. — Baromètre de Fortin.

saisissant par la partie supérieure *e*, le faire glisser le long du tube métallique gradué, et amener le plan horizontal passant par les bords supérieurs *h* de deux petites fenêtres opposées, à être exactement tangent au

sommet du ménisque mercuriel. Le numéro de la graduation qui correspond à la ligne *h* donne, en millimètres, la hauteur de la colonne barométrique (*).

128. **Baromètre fixe.** — Quand le baromètre doit être installé à poste fixe, on peut en simplifier la construction et atteindre une précision supérieure encore à celle du baromètre de Fortin.

On emploie une large cuvette de fonte MN (*fig.* 108), portant une pièce coudée à angle droit, que traverse une vis verticale *ab* terminée par deux pointes. On fait mouvoir cette vis jusqu'à ce que la pointe inférieure *a* vienne toucher la surface du mercure. Pour mesurer la hauteur barométrique, il suffit de déterminer : 1° la distance du sommet du ménisque C à la pointe supérieure *b*; 2° la distance des deux pointes; et d'ajouter ensemble ces deux distances (**).

* 129. **Corrections barométriques.** — Les hauteurs barométriques, déterminées comme on vient de le dire, doivent subir, si l'on veut qu'elles soient comparables entre elles, diverses corrections.

Et d'abord, l'action capillaire, qui s'exerce au sommet de la colonne dont le ménisque est convexe, produit une dépression dépendant surtout du diamètre du tube. De là, la nécessité d'augmenter d'une certaine quantité la hauteur observée. Cette correction est négligeable dans les baromètres fixes, dont les tubes ont un diamètre assez considérable ; elle n'est jamais négligeable dans les baromètres de Fortin. Pour la faire d'une manière rigoureuse, il est nécessaire de tenir compte, non-seulement du diamètre du tube, mais aussi de la forme du ménisque au moment de l'observation; le ménisque éprouve en effet,

Fig. 108.
Baromètre fixe.

(*) Le curseur C, dans le baromètre qui est ici représenté, se compose de trois parties : la partie supérieure *e* glisse, à frottement juste, le long du tube métallique; l'inférieure *g*, dans laquelle sont pratiquées les fenêtres, a un diamètre un peu plus grand que ce tube ; enfin, la pièce moyenne est une sorte de bague *f* retenue par l'anneau *e*, sur lequel d'ailleurs elle peut librement tourner. elle engrène, par un pas de vis, avec la pièce inférieure *g*, ainsi que le montre la coupe longitudinale jointe à la figure 107. Cette disposition est très-commode pour amener le plan des lignes *h* en contact avec le ménisque ; il suffit, en effet, d'établir *à peu près* la coïncidence comme nous l'avons dit plus haut, puis d'achever l'opération en tournant la bague *f*, ce qui n'imprime à la pièce *g* qu'un mouvement très-lent, jusqu'à ce que l'œil placé dans le plan des bords supérieurs des fenêtres, juge que la ligne formée par la superposition de ces bords est tangente à la surface du mercure.

Pour obtenir plus de précision dans les mesures, on trace sur le côté vertical de la fenêtre antérieure, en regard de la graduation du tube, une division faisant *vernier* avec elle (note, pag. 72). On peut ainsi évaluer, à un vingtième de millimètre près, la hauteur de la colonne mercurielle.

(**) Ces déterminations s'effectuent au moyen du cathétomètre. (Note de la p. 71.)

dans un même tube, des variations de forme qui tiennent, soit aux impuretés du mercure, soit aux mouvements du sommet de la colonne barométrique : on détermine la hauteur *mn* de la *flèche* du ménisque (*fig.* 109), en amenant le bord *h* de la fenêtre successivement dans le plan tangent au sommet du ménisque et dans le plan du cercle de contact. On fait alors usage de tables qui donnent la correction de capillarité, au moyen du diamètre et de la flèche du ménisque.

On trouvera plus loin (liv. II, chap. II) les corrections que l'on devra faire subir aux colonnes barométriques observées à diverses températures, pour rendre ces colonnes comparables entre elles (*).

Fig. 109.

130. **Baromètre à siphon.** — Le baromètre à siphon consiste en un tube recourbé ABD (*fig.* 110), formé de deux branches inégales; la plus grande AB est fermée à la partie supérieure, la plus petite BD est ouverte. On emplit d'abord de mercure la grande branche, en inclinant à diverses reprises le tube; on chasse, par l'ébullition, l'humidité et les bulles d'air restées adhérentes au tube; puis on redresse l'instrument, et on l'amène dans une position verticale.

Le mercure s'abaisse dans la grande branche jusqu'en C et s'élève dans la petite jusqu'en *m*. La distance verticale de ces deux points mesure la pression atmosphérique; en effet, menons par le point *m* un plan horizontal *mn* : le liquide *mBn* serait en équilibre s'il n'était sollicité que par pesanteur (82); or il est encore en équilibre dans le cas actuel, où il supporte en *m* la pression de l'atmosphère et en *n* la pression due à la colonne mercurielle *n*C : donc ces deux pressions sont équivalentes.

Pour mesurer la distance verticale des deux niveaux C et *m*, on établit, entre les deux branches, une échelle divisée en millimètres : le zéro est placé vers le milieu de cette échelle; une graduation ascendante donne la distance *h* du zéro au niveau C; une graduation descendante donne la distance *h'* du même zéro au niveau *m*. La somme $h + h'$ est la hauteur barométrique cherchée.

Fig. 110.

* L'action capillaire s'exerçant en sens contraire aux deux extrémités *m*

(*) Quand on veut rendre comparables les observations barométriques faites en divers lieux, on doit, en outre, tenir compte de ce que l'intensité de la pesanteur qui sollicite les colonnes mercurielles varie d'un lieu à un autre. — C'est là un genre de corrections dont le développement excéderait les limites du cadre de cet ouvrage.

et C de la colonne mercurielle, Gay-Lussac avait pensé que, si les deux branches du tube avaient exactement le même diamètre, on en pourrait négliger l'influence. Mais cette condition est difficile à réaliser avec exactitude; il n'arrive d'ailleurs presque jamais que les deux ménisques aient rigoureusement la même flèche.—On aurait donc tort de croire que l'emploi du baromètre à siphon comporte une précision plus grande que celui du baromètre à cuvette.

131. **Baromètre de Gay-Lussac.— Perfectionnement de Bunten.** — On doit à Gay-Lussac un baromètre à siphon d'un transport facile; le prix en est d'ailleurs moins élevé que celui du baromètre de Fortin. Les deux branches A et E (*fig.* 111) sont réunies par un tube capillaire D; une ouverture très-fine, pratiquée en *o*, permet à la pression atmosphérique de se transmettre au niveau *m* du mercure. L'instrument tout entier est enfermé dans une enveloppe de laiton, qui porte la graduation : deux fentes longitudinales opposées laissent apercevoir les deux ménisques ; enfin, deux curseurs semblables à celui du baromètre de Fortin servent à mesurer les distances *h* et *h'* du zéro aux niveaux du mercure dans les deux branches.

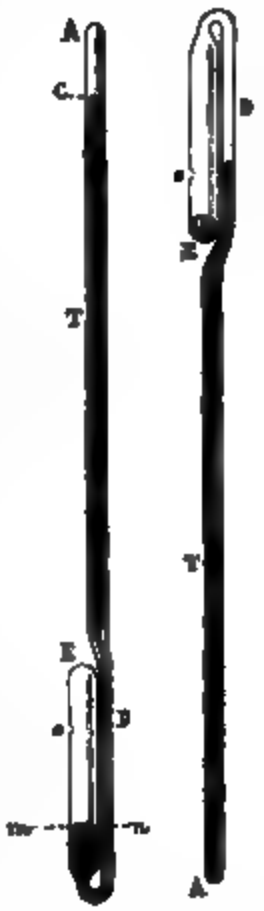


Fig. 111. Fig. 112. Fig. 113.

Pour transporter ce baromètre d'un lieu dans un autre, on l'amène, en l'inclinant graduellement et avec précaution, dans la position de la figure 112, de manière que la grande branche soit entièrement pleine de mercure. Lorsqu'on veut faire une observation, on retourne de nouveau le tube pour le placer dans sa première position. Dans ces deux mouvements, la capillarité du tube D empêche l'air de diviser la colonne liquide et de s'introduire dans la chambre barométrique.

Pour plus de sûreté encore, le constructeur Bunten, au lieu de souder directement l'extrémité du tube capillaire D à la petite branche E du baromètre, a imaginé de la terminer en une pointe effilée P (*fig.* 113), et de l'envelopper d'un renflement soufflé dans un tube de verre un peu plus gros. Il est alors impossible qu'une bulle d'air, si petite qu'elle soit, parvienne à s'introduire par cette pointe et à gagner la chambre barométrique ; elle va se loger à la partie supérieure du renflement, où sa présence n'a aucun inconvénient.

132. **Baromètre à cadran.** — Dans le *baromètre à cadran* (*fig.* 114), on retrouve le baromètre à siphon tel que nous l'avons décrit en commençant; mais, au lieu d'observer sur une échelle divisée les mouvements des niveaux du mercure, on les amplifie en les transmettant à une aiguille mobile sur un cadran. A cet effet, sur le mercure de la petite branche repose un poids p, suspendu par un fil qui passe en M sur une poulie et supporte à son autre extrémité un contre-poids p' un peu moindre que p. L'aiguille est fixée à l'axe de la poulie. Si le mercure baisse en m, l'aiguille tourne dans un sens, entraînée par le poids p, qui suit le mercure : elle marche dans le sens contraire quand le niveau monte. — Ordinairement le tube barométrique est masqué par la planchette qui porte le cadran : l'axe de la poulie traverse celui-ci en son centre, et l'aiguille est fixée à son extrémité

Fig. 114. — Baromètre à cadran. Fig. 115. — Baromètre de M. Bourdon.

antérieure; on marque sur le cadran, en face des positions diverses de l'aiguille, les hauteurs de la colonne barométrique qui leur correspondent.

Cet instrument n'est employé que comme baromètre d'appartement : il est très-peu sensible, à cause du frottement de l'axe de la poulie sur ses supports.

133. **Baromètre métallique de M. Bourdon.** — On emploie depuis quelques années des baromètres métalliques, dont le principe est différent de celui des baromètres à mercure. Dans le baromètre de M. Bourdon (*fig.* 115), *amb* est un tube métallique vide d'air, à parois très-minces et très-élastiques : on en voit la section, représentée dans des dimensions

un peu plus grandes, à droite de la figure. Ce tube est soutenu en son milieu *m* par une pièce fixée aux parois de la boîte; ses deux extrémités libres *a* et *b* s'articulent, au moyen de deux petites bielles, avec un levier *e* mobile autour d'un axe passant par son milieu : à cet axe est fixé un secteur métallique, dont l'arc denté *gh* engrène en *o* avec un pignon : enfin, l'axe de ce pignon porte une aiguille *cd*, mobile sur un cadran divisé. — Les variations qui surviennent dans la pression atmosphérique déterminent des changements de forme du tube élastique. Si la pression augmente, le tube s'aplatit, et en même temps ses deux extrémités se rapprochent; l'aiguille marche donc dans un sens. Si la pression diminue, l'élasticité du tube ramène l'aiguille en sens contraire.

Ce baromètre se gradue par comparaison avec un baromètre à mercure. Il se recommande par son peu de volume, et par la facilité avec laquelle on peut le transporter d'un lieu à un autre.

134. **Mesure des hauteurs par le baromètre.** — La hauteur barométrique diminuant à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, il serait intéressant d'obtenir une relation entre ces variations de la colonne mercurielle et les différences d'altitude correspondantes : une pareille relation permettrait, par exemple, de calculer la hauteur d'une montagne au moyen de deux observations faites *simultanément*, l'une au sommet, l'autre au pied.

Or, si l'on connaissait exactement la loi suivant laquelle décroît la densité des couches successives de l'atmosphère, on pourrait trouver par le calcul la relation cherchée; mais ces densités dépendent de plusieurs éléments, dont l'un surtout, la température, varie suivant une loi encore inconnue. On n'a donc pu établir une formule mathématique qu'en ayant recours à certaines hypothèses, et l'on a dû calculer, à l'aide de déterminations expérimentales directes, les valeurs des coefficients que cette formule renferme. — La formule qui paraît la plus précise est celle qui est due à Laplace :

$$X = 18\,393^{m}(1 + 0{,}002837\cos 2\lambda)\left[1 + \frac{2(T+t)}{1000}\right]\log\frac{H}{h}.$$

X est la hauteur cherchée, λ la latitude du lieu, T et H la température et la pression au pied de la montagne, *t* et *h* la température et la pression au sommet.

Quand la hauteur X ne dépasse pas 1000 ou 1200 mètres, on peut employer la formule plus simple, donnée par M. Babinet :

$$X = 16\,000^{m}\left[1 + \frac{2(T+t)}{1000}\right]\frac{H-h}{H+h}\ (*).$$

(*) Voir à la fin du volume, livre VI *Météorologie*, ce qui concerne les variations barométriques en un même lieu ou aux divers points du globe.

CHAPITRE V

FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ

I. — LOI DE MARIOTTE.

135. La force élastique d'un gaz augmente à mesure que son volume diminue; c'est ce que montre l'expérience du *briquet à air* (28). Mais, dans cette expérience, on ne peut songer à évaluer, ni les volumes successifs du gaz, ni les pressions qu'il supporte. On a donc dû recourir à d'autres moyens, pour obtenir une relation précise entre les volumes successifs d'une même masse de gaz et les forces élastiques correspondantes, la température restant constante.

D'abord remarquons que, lorsque le volume d'une masse gazeuse demeure constant, la force élastique de ce gaz est égale à la pression qu'il supporte; les deux expressions *force élastique du gaz* et *pression supportée par le gaz* peuvent donc être prises l'une pour l'autre.

136. **Loi de Mariotte.** — *Les volumes d'une même masse de gaz sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte, pourvu que la température reste constante.* — Cette loi a été énoncée en Angleterre par Boyle, et en France par l'abbé Mariotte, à peu près à la même époque (vers 1670); on la désigne en France sous le nom de ce dernier physicien. On la vérifie dans les cours, pour l'air en particulier, au moyen des deux expériences suivantes :

1° L'appareil connu sous le nom de *tube de Mariotte* est un tube de verre (*fig.* 116), recourbé de manière à former deux branches très-inégales A et B, et fixé sur une planche verticale. La petite branche A est fermée, la grande branche B est ouverte; la première est divisée en parties d'égale capacité, la seconde en parties d'égale longueur.

On verse du mercure dans la partie courbe du tube, afin d'enfermer un certain volume d'air en A, et l'on fait en sorte que la surface du liquide, venant d'un côté jusqu'au point M (*fig.* 117), arrive au même niveau dans

l'autre branche; ce résultat est toujours facile à obtenir, en inclinant légèrement le tube de façon à laisser sortir un peu d'air de la petite branche. A ce moment, le gaz occupant par exemple 20 divisions, sa force élastique est égale à la pression atmosphérique, puisqu'elle fait équilibre à la pression exercée par l'atmosphère sur le niveau du mercure dans la branche ouverte. — On verse alors du mercure dans la branche B, de façon que le liquide, tendant à s'élever en A, comprime l'air et réduise son volume à moitié (*fig.* 118), c'est-à-dire à 10 divisions. Si la loi de Mariotte est vraie, la force élastique de cet air doit alors être égale au double de la pression atmosphérique; or cette force élastique,

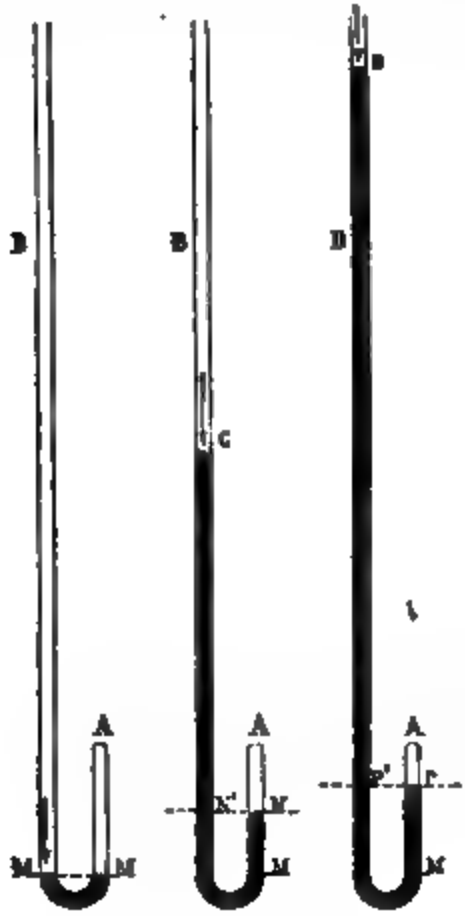


Fig. 116. — Tube de Mariotte.

Fig. 117.

Fig. 118.

Fig. 119.

qui s'exerce en N, fait équilibre à la pression qui s'exerce en N′ sur le même plan horizontal, c'est-à-dire à la pression de la colonne de mercure N′C, plus la pression atmosphérique exercée en C; donc la colonne N′C doit avoir une hauteur égale à la hauteur barométrique, c'est-à-dire à environ 76 centimètres; c'est ce que l'observation de l'échelle vérifie.—

Si le tube B a une longueur suffisante, on pourra réduire le volume de l'air au tiers AP du volume initial (*fig.* 119), et constater que sa force élastique devient alors triple de la pression atmosphérique, c'est-à-dire que la hauteur P'D du mercure au-dessus du niveau P est égale à deux fois la hauteur barométrique, et ainsi de suite.

2° Une autre expérience, due également à Mariotte, permet de constater la loi dans le cas où, prenant encore de l'air sous la pression atmosphérique, on augmente son volume de manière à diminuer sa force élastique. Soit un tube de verre bien cylindrique, B (*fig.* 120), d'environ

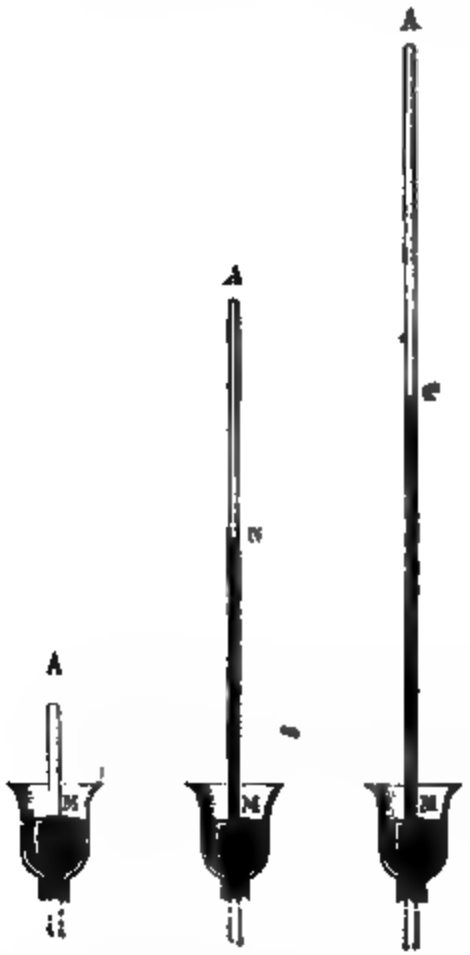


Fig. 120. Fig. 121. Fig. 122. Fig. 123.

1 mètre de longueur, fermé à l'une de ses extrémités comme un tube barométrique : on verse du mercure dans ce tube, en laissant une certaine longueur pleine d'air, 12 centimètres par exemple ; puis, on bouche l'extrémité ouverte avec le doigt, et on la plonge dans une *cuvette profonde* à mer-

cure M, formée d'une petite cuvette de verre fixée à la partie supérieure d'un long cylindre de fer vertical. On enfonce d'abord le tube, de façon que la surface du mercure qu'il contient soit sur le même plan horizontal que dans la cuvette (*fig.* 121); la force élastique de l'air contenu en AM est égale à la pression atmosphérique, puisque ces deux pressions s'exercent sur des surfaces prises au même niveau horizontal : à ce moment donc, le gaz occupe de nouveau dans le tube une longueur d'environ 12 centimètres. — On soulève alors le tube, de façon que le volume de l'air tende à s'accroître, et l'on amène ce volume à devenir double, c'est-à-dire à occuper 24 centimètres; en même temps, le mercure s'est élevé dans le tube (*fig.* 122). Si la loi de Mariotte est vraie, la force élastique de l'air doit maintenant être égale à la moitié de la pression atmosphérique; or cette force élastique ajoutée à la pression de la colonne de mercure NM doit exercer à l'intérieur du tube, au niveau du point M, une pression totale égale à la pression atmosphérique qui s'exerce extérieurement au même niveau; donc la colonne de mercure NM doit avoir une hauteur égale à la moitié de la hauteur barométrique, c'est-à-dire à environ $\frac{76^c}{2}$ ou 38 centimètres; c'est ce que la mesure directe vérifie. — On soulève encore le tube de façon que le volume AP de l'air devienne triple de ce qu'il était à l'origine, c'est-à-dire qu'il occupe 36 centimètres dans le tube (*fig.* 123); si la loi de Mariotte est vraie, sa force élastique doit alors être le tiers de la pression atmosphérique; donc, pour que cette force élastique ajoutée à la pression de la colonne de mercure PM donne une pression totale égale à la pression atmosphérique, il faut que PM ait une hauteur égale au $\frac{2}{3}$ de la colonne barométrique, c'est-à-dire à environ $76^c \times \frac{2}{3}$ ou $50^c,7$; c'est ce que la mesure directe vérifie encore, et ainsi de suite.

137. **Limite de la loi de Mariotte.** — Les appareils précédents ne permettent de faire varier le volume et la pression du gaz que dans des limites très-restreintes; en outre, ils ne comportent que peu de précision dans les mesures. On conçoit donc que, si la loi de Mariotte était seulement une loi *approchée*, des expériences de ce genre ne l'indiqueraient en aucune façon.

Les physiciens restèrent longtemps sans chercher à vérifier d'une manière précise une loi dont la simplicité paraissait *a priori* une garantie d'exactitude. — En 1823, Faraday, en soumettant un certain nombre de gaz à des pressions considérables, constata que quelques-uns d'entre eux, comme l'ammoniaque, l'acide sulfureux, le cyanogène, se transforment en liquides; dans ces expériences, les pressions ne pouvaient être déterminées que d'une manière approximative, et cependant, par la liquéfaction, le volume devenait manifestement moindre que ne l'aurait indiqué la loi

de Mariotte. — D'un autre côté, l'air et un petit nombre d'autres gaz avaient résisté à tous les essais de liquéfaction et n'avaient pu donner lieu à des remarques semblables.

On était ainsi conduit à comparer d'abord les gaz liquéfiables avec l'air, au point de vue des changements successifs qu'éprouve le volume avec la pression. — C'est ce que firent à Copenhague, Œrstedt, et à Paris, Despretz, qui soumit simultanément à une pression considérable, dans un même appareil, des volumes égaux d'air et de plusieurs gaz : le résultat de ces expériences fut que, dans les mêmes circonstances, les gaz facilement liquéfiables se compriment plus que l'air ; que l'hydrogène au contraire éprouve, sous la même pression, une diminution de volume notablement inférieure à celle de l'air. — Enfin Pouillet, avec un appareil semblable, qui permettait d'obtenir des pressions d'environ 100 atmosphères, confirma ces conclusions, avec une précison plus grande.

Il restait donc encore : 1° à savoir si l'air suit ou non la loi de Mariotte d'une manière rigoureuse ; 2° à déterminer la grandeur des quantités dont les autres gaz s'en écartent.

138. **Principe de la méthode de Dulong et Arago.** — Dulong et Arago furent conduits, par une série de travaux dirigés vers un autre but, à étudier la première de ces questions. Leur appareil, dont la figure 124 peut donner une idée, n'était autre qu'un tube de Mariotte construit avec des dimensions colossales. La grande branche NS était formée par une suite de treize tubes de cristal, de 2 mètres chacun, qui étaient appliqués sur des poutres dressées dans la vieille tour carrée du lycée Napoléon ; la petite branche MT était formée par un tube semblable, fermé à son extrémité supérieure, et environné d'un manchon plein d'eau pour que la température de l'air y fût constante ; ces deux branches verticales étaient mastiquées dans un tuyau de fonte horizontal MN. Au lieu de verser le mercure par la partie supérieure de la grande branche, on l'introduisait par la partie inférieure, en faisant fonctionner une petite pompe à eau P, qui puisait de l'eau par le tube *t* dans un réservoir voisin et refoulait cette eau à la surface *ab* du mercure.

Fig. 124.

Il est facile, sans entrer dans plus de détails, d'indiquer le défaut principal de cette méthode : soit TA le volume occupé par l'air sous la pression atmosphérique, et supposons, pour plus de simplicité, que le tube soit rigoureusement cylindrique et ait une longueur de 2 mètres au-dessus du point A. La loi de Mariotte étant au moins une loi approchée, pour des pressions successives de 2, 3, 5, 10, 20 atmosphères, le gaz doit occuper des longueurs de tube représentées à peu près par $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{5}, \frac{1}{10}, \frac{1}{20}$ de AT. Or, dans l'évaluation de la première longueur BT, égale à environ 1 mètre, une erreur de lecture d'un millimètre représente seulement un millième du volume du gaz : la même erreur absolue d'un millimètre, commise sur la dernière longueur TK, c'est-à-dire sur 1 décimètre, représente la centième partie du volume du gaz ; elle a donc une valeur relative 10 fois aussi grande, et il est à craindre que, pour les pressions considérables, ces erreurs n'atteignent un ordre de grandeur supérieur aux différences qu'on devrait constater. — Aussi, bien que l'appareil eût été construit avec un soin extrême, bien que l'habileté des expérimentateurs pût même suppléer, jusqu'à un certain point, aux défauts du procédé, ou trouva pour l'air des différences si petites entre les résultats obtenus et la théorie, qu'on les mit sur le compte des erreurs d'expériences, et l'on admit, pour ce gaz, l'exactitude absolue de la loi de Mariotte.

139. **Principe de la méthode de M. Regnault.** — Enfin, M. Regnault apporta à cette même méthode une modification qui en fit une méthode nouvelle, en permettant d'évaluer les volumes successifs du gaz avec une précision constante. Dans l'appareil qu'il fit construire au Collége de France (*fig.* 125), la partie supérieure de la petite branche fut munie d'un robinet *r*, capable de garder les gaz sous des pressions de plusieurs atmosphères, et communiquant par un tube métallique *o'* avec un réservoir où l'on avait comprimé une assez grande masse du gaz sur lequel on devait opérer. Pour introduire le mercure dans les deux branches de l'appareil, on se servait, comme dans la méthode de Dulong et Arago, d'une petite pompe P, qui comprimait à la surface du mercure, dans le cylindre C, l'eau qu'elle puisait dans le vase V ; mais cette pompe était placée d'un même côté des deux tubes verticaux, et, aussitôt qu'on l'avait fait fonctionner, on fermait le gros robinet R, afin d'intercepter la communication et de maintenir les niveaux bien constants.

Voici maintenant en quoi consiste surtout la supériorité de la méthode. Deux traits *a* et *b* avaient été marqués sur le verre; le volume intérieur du tube compris entre eux avait été exactement déterminé; il était sensiblement égal à la moitié du volume compris entre *a* et *r*. Pour faire une expérience, on introduisait d'abord du gaz par le robinet *r* jusqu'à ce que le niveau de mercure descendît au point *a*, et on déterminait la pression de ce gaz, au moyen de la différence de hauteur du mercure dans les deux

branches et de la hauteur barométrique au moment de l'observation. On faisait ensuite marcher la nière à refouler le merc che jusqu'en *b*, c'est-à-di moitié; on déterminait on pouvait vérifier si elle port à la première fût des volumes; s'il y avait résultat de l'expérience la loi de Mariotte supp naissait le sens et la gra sous une pression plus on laissait entrer une nc comprimé, de façon qu revint en *a*: après avoi on comprimait encore l niveau revint en *b*; on pression, et ainsi de su les plus considérables q longueur de la grande médiatement que les vc connus, sous les pressic même approximation.

140. **Résultats.** — L gnault furent faites sur l bonique et l'hydrogène l'oxygène pur, parce qu le mercure. — Les trois premiers gaz s'écartèrent de la loi de Mariotte dans le même pressions croissantes, le des diminutions succes que cette loi ne l'indi considérable pour l'air beaucoup plus grand nique, c'est-à-dire pour fiable sur lequel on eût pression approcha de 1 volume devint $\frac{1}{16}$ du v

près les expériences de Despretz (137), on peut dire qu'il en est de même de tous les gaz liquéfiables, et en outre, qu'ils s'écartent d'autant plus de la loi de Mariotte, dans ce même sens,

qu'ils sont plus voisins de leur point de liquéfaction. — Au contraire, l'hydrogène s'écarta toujours de la loi dans un sens opposé; c'est-à-dire que, pour des pressions croissantes, son volume éprouva toujours des diminutions *moindres* que ne l'indiquait la loi : c'est là une exception qui est restée jusqu'ici inexpliquée.

Du reste, les différences entre ces résultats de l'expérience et la loi de Mariotte ne se produisant que dans des conditions presque exceptionnelles, on peut considérer cette loi comme exacte, dans la plupart des cas où l'on a à l'appliquer : c'est ce que nous ferons dans tout ce qui va suivre.

141. **Applications de la loi de Mariotte.** — Si V est le volume d'une masse de gaz sous la pression P, V′ le volume correspondant à une autre pression P′, on peut traduire l'énoncé de la loi de Mariotte par la formule

$$\frac{V}{V'} = \frac{P'}{P},$$

formule qui peut s'écrire, en chassant les dénominateurs.

$$VP = V'P', \tag{1}$$

Or, P″ désignant une pression quelconque, il est clair que si P″ est une troisième pression et V″ le volume correspondant de la même masse gazeuse, on aura encore $VP = V''P''$, et ainsi de suite, en sorte qu'on peut écrire :

$$VP = V'P' = V''P'' = \ldots,$$

ce qui s'exprime en disant que *le produit du volume d'une masse gazeuse par la pression correspondante est constant, quelle que soit cette pression.*

La formule (1) permet de résoudre immédiatement les deux problèmes suivants :

1° *Connaissant le volume d'une masse gazeuse sous une pression donnée, trouver son volume sous une autre pression donnée.* — Soit, par exemple, une masse gazeuse occupant un volume de 8 litres sous la pression de 480 millimètres; supposons qu'on demande son volume sous la pression de 640 millimètres. Les volumes variant en raison inverse des pressions, le volume inconnu est, d'après le raisonnement qu'on fait en Arithmétique dans tous les cas semblables,

$$8^{\text{lit}} \times \frac{480}{640} = 6^{\text{lit}}.$$

2° *Connaissant la force élastique d'une masse gazeuse dont le volume est donné, trouver la force élastique qu'elle doit acquérir sous un autre volume donné.* — Ce problème se résoudra d'une manière tout à fait semblable.

En général, dans le premier problème, V′ étant l'inconnue, la formule (1) donne immédiatement :

$$V' = V\frac{P}{P'}$$

Dans le second problème, P′ étant l'inconnue, la même formule donne :

$$P' = P\frac{V}{V'}$$

142. Évaluation du volume d'une masse gazeuse sous la pression normale. — Lorsque, pour comparer entre elles diverses quantités de gaz, on mesure les volumes qu'ils occupent, les résultats ne sont immédiatement comparables qu'autant que les mesures ont été effectuées sous la même pression pour chacun des gaz. Or, dans la plupart des cas, on ne peut pas disposer à volonté des pressions ; mais si les pressions des divers gaz sont connues, on peut calculer le volume que chacun d'eux occuperait si la pression avait une valeur déterminée, la même pour toutes. — On évalue, en général, les volumes des gaz sous la pression de 760 millimètres, qui est la valeur moyenne de la pression atmosphérique dans nos contrées : c'est cette pression qu'on désigne sous le nom de *pression normale*.

Supposons, par exemple, que l'on ait un gaz contenu dans une éprouvette graduée en parties d'égale capacité, et placée sur le mercure, et que l'on puisse amener le niveau à être le même à l'intérieur qu'à l'extérieur (*fig.* 126); le volume V du gaz sera donné par la graduation ; sa pression sera celle de l'atmosphère H, laquelle est donnée par l'observation du baromètre au même instant. Dès lors, le volume V′ que le gaz occuperait sous la pression normale, sera donné par la formule :

$$V' = V.\frac{H}{760}.$$

Si les dimensions relatives de la cuve et de l'éprouvette ne permettent pas d'amener les deux niveaux sur le même plan horizontal, et que le niveau dans l'éprouvette soit au-dessus du niveau extérieur (*fig.* 127), la force élastique du gaz est égale à la hauteur barométrique H diminuée de la différence h des niveaux. Connaissant donc, au moyen de la graduation de l'éprouvette, le volume V du gaz sous la pression $H - h$, on en déduira son volume sous la pression normale, au moyen de la formule

Fig. 126. Fig. 127.

$$V' = V.\frac{H - h}{760}$$

II. — MESURE DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ. — MANOMÈTRES.

143. Manomètres. — On donne le nom en général de *manomètres* aux appareils destinés à mesurer les forces élastiques des gaz et des vapeurs.

Dans l'industrie, on n'a pas besoin, en général, d'atteindre une grande précision dans cette évaluation. — On verra plus loin, par exemple, que les machines à vapeur doivent, pour fonctionner régulièrement, recevoir de la vapeur sous une force élastique qui ne doit varier, pour chaque espèce de machines, qu'entre certaines limites déterminées; d'un autre côté, les parois de la chaudière offrent une résistance qui a été calculée en conséquence. Il est donc nécessaire que le chauffeur connaisse approximativement, à chaque instant, la force élastique acquise par la vapeur, afin de diriger convenablement le feu; aussi les règlements exigent-ils que toutes les chaudières portent au moins un manomètre. Ces instruments sont le plus souvent construits d'une manière assez grossière, mais suffisante pour cet usage. — C'est seulement de cette espèce de manomètres qu'il sera question dans ce chapitre.

144. Manomètres à air libre. — Le manomètre à air libre le plus simple consiste en un tube de verre MN (*fig.* 128), ouvert à ses deux extrémités et plongeant dans un petit réservoir de mercure A; le réservoir est placé dans un cylindre métallique B, le tube est mastiqué solidement en C, et la vapeur, arrivant dans le cylindre par le robinet R, peut faire monter le mercure dans le tube. Cet appareil n'étant pas destiné à une évaluation précise, on suppose le niveau du mercure invariable dans le réservoir. — Si le niveau dans le tube est sur le même plan horizontal que dans le réservoir, la pression dans la chaudière est égale à la pression atmosphérique; lorsque la pression dans la chaudière devient 2 atmosphères, le mercure monte, dans le tube, de 76 centimètres; si la pression devient 3 atmosphères, la hauteur du mercure devient égale à 76×2; et ainsi de suite. On peut donc marquer 2, 3,... atmosphères, sur la planche qui supporte le tube, à des distances du niveau du mercure dans la cuvette égales à 76c, à $76^c \times 2$,... En subdivisant ensuite cet intervalle, on peut évaluer les fractions égales à $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, d'atmosphère.

Fig. 128. Manomètre à air libre.

Quand la pression doit atteindre 5 ou 6 atmosphères, la disposition précédente aurait le double inconvénient d'exiger des tubes de verre très-longs, et de rendre le sommet de la colonne peu commode à observer; on

remplace alors le tube de verre par un tube de fer (*fig.* 129), et on place à la surface du mercure un flotteur *p*, supporté par un fil qui passe sur une poulie et qui est tendu par un contre-poids *p'* : quand le mercure monte ou descend, le poids *p'* se meut en sens contraire, le long d'une échelle tracée sur la planche. Les pressions qu'on évalue alors le plus commodément sont celles qui sont voisines de 4 ou 5 atmosphères.

Une autre disposition (*fig.* 150) du manomètre à air libre permet d'évaluer avec la même facilité les différentes pressions. La vapeur, traversant le robinet R, se répand dans un cylindre métallique A, et vient presser à la surface du mercure dans la branche B d'un long tube métallique courbé en U; l'autre branche C se continue à sa partie supérieure avec un tube cylindrique de verre D, beaucoup plus large, et communique avec l'atmosphère par l'ouverture O. Le mercure arrive au niveau *mn* dans les deux branches lorsqu'elles communiquent avec l'atmosphère. Si la pression du côté B devient de 2 atmosphères, le mercure descend dans cette branche et monte en D, mais d'une quantité beaucoup moindre, jusqu'à ce que la différence de niveau soit de 76 centimètres, et ainsi de suite pour les pressions suivantes. Les chiffres qui indiquent 1, 2, 3, 4 atmosphères sont donc à de petites distances les uns des autres; ces distances peuvent être déterminées par un calcul simple, si l'on connaît le rapport des diamètres des tubes. Ordinairement, le tube BC est enterré, de façon que le robinet R soit au niveau de la chaudière, et que le tube de verre D soit commode à observer; le cylindre métallique F est destiné à recevoir le mercure, dans le cas où une augmentation trop rapide de la pression le ferait sortir du cylindre D.

Fig. 129. Fig. 130.
Manomètres à air libre.

Les manomètres à air libre, longtemps exigés par les règlements pour toutes les machines où la pression ne devait pas dépasser 4 ou 5 atmosphères, ont l'avantage d'offrir une précision qui demeure la même en tous les points de l'échelle. Ils ont l'inconvénient de présenter une grande longueur, et d'être assez encombrants.

145. **Manomètres à air comprimé.** — Le manomètre à air comprimé le plus simple se rapproche, par sa forme, du manomètre à air libre de la figure 128; il en diffère en ce que le tube de verre est beaucoup plus court et fermé à sa partie supérieure M (*fig.* 131). L'air enfermé dans ce tube se comprime quand le mercure monte, et, pour évaluer la pression qui s'exerce en A, il faut ajouter à la pression de la colonne de mercure la force élastique de cet air, qui varie en raison inverse de son volume. On voit donc que la pression de 2 atmosphères doit être indiquée à une distance du sommet M un peu plus grande que la moitié de MA; celle de 3 atmosphères, à une distance un peu plus grande que le tiers de MA, et ainsi de suite (*).

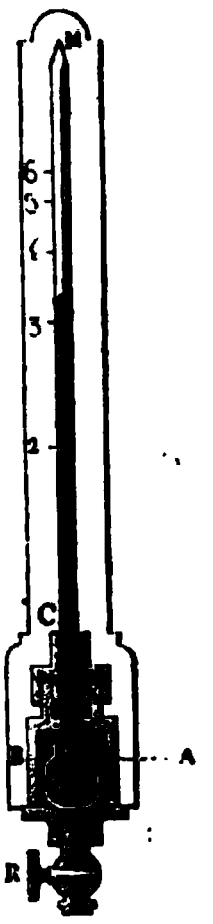


Fig. 131. Manomètre à air comprimé.

Les avantages de cet instrument sont manifestes : il peut n'avoir qu'une petite hauteur, et, par suite, il est plus facilement transportable que le précédent. Mais les chiffres qui marquent les pressions un peu grandes, 8, 9, 10, arrivent à être tellement voisins les uns des autres, qu'une petite erreur dans l'observation du niveau du mercure correspond à une erreur considérable dans l'évaluation de la pression.

146. **Manomètres métalliques.** — Aux manomètres à mercure on substitue, pour la plupart des machines à haute pression et pour les locomotives, des manomètres dont le jeu repose sur l'élasticité des métaux. Nous en indiquerons deux des principaux.

(*) Ces distances peuvent être déterminées par le calcul, en supposant que le tube soit bien cylindrique à l'intérieur, de sorte qu'on puisse représenter les volumes de l'air par les longueurs qu'il occupe. — Soit l la longueur du tube depuis le sommet M jusqu'au niveau du mercure, supposé invariable; soit x la longueur du tube qui est occupée par l'air sous une pression H; cet air occupe d'abord un volume représenté par l sous la pression atmosphérique h, puis un volume représenté par x sous la pression $H-(l-x)$; on a donc, d'après la loi de Mariotte,

$$\frac{x}{l}+\frac{h}{H-l+x},$$

d'où l'on tire l'équation

$$x^2+x(H-l)-lh=0$$

$$x=-\frac{H-l}{2}\pm\sqrt{\left(\frac{H-l}{2}\right)^2+lh}.$$

Ces deux valeurs de x sont réelles, mais celle qui correspond au signe — du radical est négative et ne peut évidemment pas convenir; le signe + doit donc seul être conservé. En prenant successivement pour valeurs de H les multiples de $0^m,76$, on saura à

Manomètre de M. Bourdon. — Ce manomètre (*fig.* 132 et 133) se compose, comme le baromètre déjà décrit (*fig.* 115), d'un tube métallique à parois minces et élastiques, dont la section est semblable à celle qui est indiquée à droite de la figure 115, page 102. Le tube est enroulé en spirale, et communique avec la chaudière par une de ses extrémités qui est fixe, comme on le voit dans la figure 133; lorsque la pression intérieure augmente, la spirale tend à s'ouvrir, et l'extrémité libre du tube entraîne une aiguille qui se meut sur un cadran divisé, où les pressions sont marquées en atmosphères (*fig.* 132). La graduation est faite par comparaison avec un manomètre déjà construit.

Fig. 132. Manomètre de M. Bourdon.

Fig. 133.

Fig. 134. Manomètre de M. Desbordes.

Manomètre de M. Desbordes. — La pièce principale de ce manomètre (*fig.* 134) est une lame d'acier élastique *ab*, fixée par ses extrémités : la pression de la vapeur s'exerce sur la lame de cuivre mobile D, puis sur la plaque de caoutchouc C qui empêche le contact direct entre la vapeur et le piston P : cette pression se transmettant en *c*, à la lame d'acier *ab*, la

quelles distances de M on devra marquer les chiffres qui indiquent les pressions en atmosphères.

On pourrait encore tenir compte de l'abaissement du mercure dans la cuvette, étant donné le rapport de son diamètre à celui du tube : nous laisserons au lecteur le soin de résoudre cette question, qui n'offre aucune difficulté, et qui conduit, en prenant la même inconnue, à une équation semblable. — Ces instruments n'ont pas une précision assez grande pour qu'on doive prendre la peine de faire cette dernière correction.

fait fléchir, et met en mouvement le secteur denté S et par suite l'aiguille. Un ressort R ramène le secteur en sens inverse quand la pression diminue. Ici encore, la graduation ne peut être faite que par comparaison.

III. — MÉLANGE DES GAZ.

147. Diffusion des gaz. — Les divers liquides ne peuvent pas toujours être mélangés entre eux ; si l'alcool et l'eau, mis en contact, se mêlent assez intimement pour qu'on trouve bientôt dans tous les points de la masse des proportions égales de l'un et de l'autre, l'eau et le mercure au contraire ne peuvent se pénétrer de la même façon ; lors même qu'on essaye d'effectuer le mélange par l'agitation, le mercure, suspendu d'abord en gouttelettes au milieu de l'eau, se rassemble promptement par le repos à la partie inférieure du vase. — Il n'en est pas de même des gaz : il est facile de constater, non-seulement que ces corps sont toujours miscibles, mais qu'ils tendent toujours à se mélanger lorsqu'ils sont en contact, quelle que soit d'ailleurs leur nature.

Si l'on juxtapose les ouvertures de deux éprouvettes (*fig.* 135) contenant, l'éprouvette inférieure de l'air, l'éprouvette supérieure de l'hydro-

Fig. 135.

Fig. 136.

gène, on constate au bout de peu de temps que, malgré la différence de leurs densités, les deux gaz se sont mélangés ; on obtient, en effet, une détonation lorsqu'on approche une bougie de l'ouverture de l'une ou de

l'autre éprouvette, ce qui indique un mélange de l'hydrogène avec l'oxygène de l'air. — Au bout d'un temps suffisant, la composition du mélange deviendrait exactement la même dans toute la masse. Ce fait a été établi par une expérience célèbre de Berthollet : on plaça dans les caves de l'Observatoire, c'est-à-dire dans un lieu calme et à température parfaitement constante, deux ballons à robinet (*fig.* 136) vissés l'un au-dessus de l'autre : le ballon supérieur contenait de l'hydrogène, le ballon inférieur de l'acide carbonique, dont la densité est vingt-deux fois aussi grande ; chacun des gaz avaient été introduit sous une pression exactement égale à la pression atmosphérique. Les robinets ayant été ouverts, le mélange s'effectua de façon que chacun des deux ballons contint les deux gaz en proportions sensiblement égales. — Donc, dans ces expériences, la force élastique de chaque gaz a toujours pour résultat de lui faire occuper la capacité totale de l'enveloppe, sans que la présence de l'autre gaz soit un obstacle à cette expansion. Cette pénétration des gaz les uns par les autres a reçu le nom de *diffusion*.

Il va sans dire que, si les gaz sont superposés de façon que le plus dense soit à la partie supérieure, la diffusion se fait beaucoup plus vite ; mais la seule différence est dans la rapidité avec laquelle la pénétration a lieu, et non dans le résultat définitif.

Ces phénomènes expliquent comment les odeurs dues à des gaz ou à des vapeurs se répandent dans l'air avec tant de rapidité. — Ils nous aideront aussi à comprendre comment les vapeurs d'un liquide volatil peuvent se former et se renouveler dans un espace occupé déjà par un gaz, à peu près comme dans un espace vide.

148. **Loi du mélange des gaz.** — *Dans un mélange de plusieurs gaz, la force élastique est égale à la somme des forces élastiques de tous les gaz, considérés chacun comme occupant le volume du mélange tout entier.* — Cette loi, énoncée vers 1805 par Dalton, peut se démontrer de la manière suivante :

Soit plusieurs éprouvettes C, C′, C″..... (*fig.* 137), graduées en parties d'égales capacités, placées sur le mercure et contenant différents gaz : observons dans chacune d'elles les volumes des gaz, v, v', v''..., au moyen de la graduation, et les pressions p, p', p''..., au moyen des hauteurs des colonnes de mercure et de la pression barométrique. Introduisons ensuite tous ces gaz dans une même éprouvette, et faisons occuper au mélange un volume V quelconque ; si le premier gaz occupait seul le volume V, sa force élastique serait $p\,\frac{v}{V}$; de même, les forces élastiques des autres

Fig. 137.

gaz, sous le même volume V, seraient $p'\frac{v'}{V}$, $p''\frac{v''}{V}$..... Si la loi de Dalton est vraie, la force élastique P du mélange doit donc être

$$P = p\frac{v}{V} + p'\frac{v'}{V} + p''\frac{v''}{V} + \ldots\ldots;$$

c'est ce que vérifie l'observation directe de la pression, dans l'éprouvette qui contient le mélange.

* 149. L'énoncé de cette loi peut être présenté sous une autre forme, qui est commode pour la résolution de certaines questions : *Le volume d'un mélange de gaz est égal à la somme des volumes de tous les gaz, considérés chacun comme soumis à la pression totale du mélange.*

En effet, l'équation précédente peut s'écrire

$$PV = pv + p'v' + p''v'' + \ldots\ldots;$$

d'où l'on tire

$$V = v\frac{p}{P} + v'\frac{p'}{P} + v''\frac{p''}{P}\ldots,$$

formule qui est précisément la traduction du dernier énoncé.

IV. — MÉLANGE DES LIQUIDES ET DES GAZ.

150. **Dissolution des gaz dans les liquides.** — L'eau pure, mise en présence d'une atmosphère d'oxygène, en absorbe une certaine quantité, qui augmente avec la pression du gaz; le gaz absorbé se dégage complétement lorsqu'on vient à faire le vide à la surface du liquide, et il reste de l'eau pure. — Dans ce phénomène, et dans tous les phénomènes semblables, les molécules du gaz semblent avoir simplement pénétré entre celles de l'eau; la force élastique du gaz est même restée manifeste, puisqu'il abandonne le liquide ou y entre de nouveau, selon que la pression extérieure augmente ou diminue; c'est seulement à ce genre d'action que nous donnerons le nom de *dissolution des gaz*.

151. **Loi de la dissolution des gaz dans les liquides.** — 1° *Les quantités d'un gaz dissoutes par l'unité de volume d'un liquide sont proportionnelles à la pression que ce gaz exerce sur la surface du liquide.*

Cette première loi peut être considérée comme caractérisant la dissolution proprement dite. On voit, en effet, d'après l'énoncé, que l'action du vide à la surface du liquide doit produire le dégagement complet du gaz; le gaz dissous doit encore se dégager entièrement quand le liquide se trouve placé dans un espace indéfini, occupé par un gaz.

On appelle *coefficient de solubilité* d'un gaz dans un liquide, à une température déterminée, le nombre qui exprime le volume de gaz, évalué à la température de zéro et à la pression de 760 millimètres, que peut dissoudre, à cette température, l'unité de volume du liquide, sous la

pression normale. La valeur de ce nombre dépend à la fois de la nature du liquide et de celle du gaz; l'expérience seule peut la faire connaître. — Les coefficients de solubilité des divers gaz, dans l'eau par exemple, offrent entre eux des différences considérables : ainsi 1 litre d'eau à la température de 15 degrés absorbe, sous la pression normale, $0^{lit},030$ d'oxygène, $0^{lit},015$ d'azote, 1 litre d'acide carbonique, et environ 670 litres de gaz ammoniac.

2° *Lorsqu'un mélange de plusieurs gaz est en présence d'un liquide, chacun d'eux se dissout comme s'il était seul.*

Pour nous rendre compte de la signification de cet énoncé, considérons par exemple, l'action dissolvante de l'eau sur l'air atmosphérique. Un volume quelconque d'air, mesuré sous la pression normale, contient environ $\frac{1}{5}$ d'oxygène et $\frac{4}{5}$ d'azote, mesurés sous la même pression : chacun des gaz occupant le volume du mélange tout entier, leurs forces élastiques sont représentées, pour le premier, par $\frac{1}{5}$ de la pression totale; pour le second, par $\frac{4}{5}$ de la même pression. Leurs coefficients de solubilité étant respectivement 0,030 et 0,015, 1 litre d'eau doit donc dissoudre, d'après l'énoncé :

$$0^{lit},030 \times \frac{1}{5} = 0^{lit},006 \text{ d'oxygène.}$$

$$0^{lit},015 \times \frac{4}{5} = 0^{lit},012 \text{ d'azote,}$$

$$\text{En tout } \overline{0^{lit},018}$$

Or les nombres 0,006, et 0,012 sont respectivement égaux au tiers et aux deux tiers de 0,018; le mélange de gaz qu'on pourrait extraire de l'eau aérée doit donc contenir environ $\frac{1}{3}$ d'oxygène et $\frac{2}{3}$ d'azote; on voit qu'il doit être plus riche en oxygène que l'air atmosphérique.

Pour vérifier ces résultats, le procédé le plus simple consiste à dégager les gaz de l'eau, en se fondant sur cette propriété, que la solubilité des gaz devient à peu près nulle à la température où l'eau entre en ébullition. Prenons de l'eau qui ait séjourné au contact de l'air, et emplissons-en un ballon A (*fig.* 138), auquel nous adapterons un tube B également plein d'eau, de façon qu'il ne reste aucune bulle d'air dans l'appareil; engageons l'extrémité de ce tube sous une éprouvette C pleine de mercure, et chauffons l'eau du ballon. Dès que la température commencera à s'élever, nous verrons les gaz dissous monter dans l'eau en une multitude de petites bulles, qui passeront sous la cloche. L'eau s'échauffant davantage, il se produira des bulles plus grosses : mais ces dernières sont formées surtout de vapeur d'eau, car elles régénèrent de l'eau liquide en arrivant

dans les parties froides. Bientôt le volume du gaz qui, dans l'éprouvette, surmonte la petite couche d'eau entraînée à la surface du mercure, restera sensiblement constant, et l'opération sera terminée. — Or la mesure directe du volume total occupé par le mélange gazeux, sous la pression

Fig. 138.

normale, et la détermination des proportions d'oxygène et d'azote qu'il contient, s'accordent sensiblement, pour la plupart des eaux douces de nos contrées, avec les résultats donnés par le calcul qui précède.

152. **Phénomènes se rapportant à la dissolution des gaz.** — Les deux lois précédentes expliquent un certain nombre de phénomènes qui nous sont offerts par la nature ou par les opérations industrielles.

Les eaux des lacs ou des sources dissolvent les gaz de l'air en quantités très-variables, selon la pression que l'atmosphère exerce à leur surface ; au sommet des montagnes elles peuvent contenir, en valeur absolue, à peine un tiers des gaz qu'elles dissolvent dans la plaine. De là peut-être, d'après M. Boussingault, la fréquence des goîtres dans les pays très-élevés, attribuable en partie l'usage de ces eaux peu aérées.

Certaines sources d'eaux minérales, en arrivant à la surface de la terre, laissent dégager des gaz, et en particulier des bulles d'acide carbonique qui les rendent effervescentes . ces gaz s'échappent quand l'eau arrive au contact de l'air qui n'en contient que des traces. — Les eaux gazeuses artificielles s'obtiennent en comprimant, au moyen d'une pompe, de l'acide carbonique à la surface de l'eau, et en enfermant ensuite ce liquide dans des bouteilles hermétiquement bouchées; quand le bouchon vient à être enlevé, le gaz dissous se dégage en petites bulles, mais l'eau en conserve toujours une quantité suffisante pour avoir un goût acidule. — Les vins mousseux et les liqueurs semblables, comme la bière, le cidre, contiennent également en dissolution de l'acide carbonique, produit par la fermentation qui s'est continuée dans la bouteille après qu'elle a été bou-

chée. La mousse que ces liqueurs débouchées produisent est due à leur viscosité, qui s'oppose momentanément au dégagement du gaz.

Enfin, on emploie dans les usages domestiques un appareil qui permet de préparer les eaux gazeuses peu de temps avant le moment où elles doivent être consommées. Il se compose de deux vases de verre *a* et *b* (*fig.* 139), qui peuvent se visser l'un sur l'autre par leurs garnitures en étain. Pour préparer la solution gazeuse, on place dans le vase *a* un mélange en poudre d'acide tartrique et de bicarbonate de soude, substances qui n'exercent *à sec* aucune action chimique l'une sur l'autre; puis on y adapte le bouchon métallique creux *f* (*fig.* 140), qui est fermé à sa partie supérieure par une plaque d'argent *h*, criblée de trous très-fins, et traversée par le tube d'étain *g*. Cela fait, on visse le vase *a* renversé sur le vase *b* préalablement rempli d'eau, et on redresse l'appareil dans la position de la figure 139. Une petite quantité d'eau descend par le tube dans le vase *a*; l'acide tartrique, se dissolvant dans cette eau, exerce sur le bicarbonate de soude une action chimique d'où résulte un dégagement d'acide carbonique; le gaz passe par les trous de la plaque *h*, qui sont trop fins pour laisser passer l'eau, et on le voit monter en bulles dans le liquide, où une partie est immédiatement absorbée. L'excès de gaz se rend à la surface de l'eau. La pression qui, dans les premiers moments, atteint 5 à 6 atmosphères, descend bientôt à 3 atmosphères et demie environ; du reste, les vases sont ordinairement entourés d'un treillage de joncs qui s'opposerait, en cas de rupture, à la projection des fragments de verre. Lorsqu'on ouvre le robinet *i*, le liquide jaillit avec force, et laisse, en arrivant à l'air, dégager des bulles gazeuses en très-grand nombre.

Fig. 139. Fig. 140.

* 153. **Action des solutions salines sur les gaz.** — Quand on fait dissoudre dans l'eau divers sels et qu'on met les solutions en présence d'un gaz, comme l'oxygène, l'acide carbonique ou l'air, on remarque qu'elles en absorbent des quantités différentes de celles qu'absorberait l'eau pure; en outre, ces quantités semblent le plus souvent se soustraire complétement aux lois de la dissolution proprement dite (151). — Ces actions, signalées d'abord sans explications, ont été étudiées par M. É. Fernet, dans quelques cas particuliers. Voici quelques-uns des résultats obtenus.

L'action des solutions salines sur les gaz n'est pas un simple phéno-

mène de dissolution, avec un coefficient de solubilité particulier, car les quantités de gaz absorbées ne varient pas, en général, proportionnellement à la pression. — D'autre part, ce n'est pas une simple action chimique, car les quantités absorbées ne sont pas complétement indépendantes de la pression. —Dans la plupart des cas, l'absorption se montre comme un phénomène complexe, dépendant à la fois de la dissolution simple et de la combinaison chimique ; en d'autres termes, le volume de gaz absorbé se compose de deux parties, dont l'une varie proportionnellement à la pression, l'autre en est indépendante et proportionelle à la richesse en sel de la solution. Il est à remarquer que le coefficient de *solubilité propre* qui régit le premier de ces deux termes est toujours moindre que celui de l'eau pure pour le même gaz, et diminue à mesure que la quantité de sel augmente.

De là résulte : 1° que *si le gaz n'est pas susceptible de se combiner chimiquement* avec le sel dissous, l'absorption totale est toujours moindre que dans l'eau, et suit d'ailleurs la loi de la dissolution (151, 1°) : tel est le cas des solutions de chlorure de sodium (sel marin) mises en contact avec l'oxygène ou l'air : la présence de ce sel peut donc être considérée comme diminuant toujours l'absorption de ces gaz par l'eau, et d'autant plus qu'il est en quantité plus considérable. — 2° Au contraire, *si le gaz peut se combiner* avec le sel en proportion un peu considérable, l'influence de la pression sur la quantité de gaz dissous devient relativement presque insensible, et ne peut d'ailleurs être observée que par des méthodes assez délicates ; tel est le cas des solutions de phosphate ou de carbonate de soude, mises en contact avec l'acide carbonique ; bien que ces sels diminuent la solubilité propre du gaz, leur présence doit être considérée comme augmentant très-notablement le pouvoir absorbant total du liquide, et comme rendant l'absorption presque indépendante de la pression. — Enfin, dans d'autres cas, les deux actions sont du même ordre de grandeur, et alors la présence du sel, tout en modifiant la loi du phénomène, n'en change pas beaucoup l'intensité ; mais ces cas, aussi dignes d'intérêt que les premiers au point de vue de la théorie, le sont beaucoup moins au point de vue pratique.

154. *Applications.* — Ces notions sont, comme les précédentes, susceptibles de nombreuses applications. Les eaux des sources, des rivières, des lacs, des mers, tiennent en dissolution des sels très-différents et en proportions très-diverses : cette influence doit donc s'ajouter à celle de l'altitude (152), pour faire varier beaucoup la quantité de gaz qu'elles absorbent et leurs qualités comme boisson. — De là résulte aussi que ces diverses eaux ne sont pas également propres à fournir les gaz nécessaires à la respiration des poissons et des autres animaux aquatiques ; tout le monde sait, en effet, que les différentes eaux ne peuvent pas être habitées indifféremment par les diverses espèces de ces animaux. — Enfin, le sang, qui vient dans les organes respiratoires absorber les gaz de l'air et déga-

ger de l'acide carbonique, ne se comporte pas à l'égard de ces gaz comme l'eau, mais comme un liquide tenant en dissolution divers sels. Or, parmi ces sels, les uns augmentent le pouvoir absorbant de l'eau pour les gaz de la respiration, les autres le diminuent : on s'explique donc ainsi comment, les quantités de certains sels venant à s'écarter des proportions normales, leur accroissement ou leur diminution coïncide avec une suractivité ou un ralentissement de la fonction respiratoire. — Il en est sans doute de même des liquides qui exercent chez les végétaux des fonctions analogues.

V. — EXTENSION DU PRINCIPE D'ARCHIMÈDE AUX GAZ. AÉROSTATS.

155. **Poussée éprouvée par les corps plongés dans les gaz.** — Si l'on se reporte à la démonstration du principe d'Archimède, donnée plus haut pour les corps plongés dans les liquides (87), on voit que le raisonnement convient, de tous points, aux corps plongés dans les gaz. Donc :

Tout corps plongé dans un gaz pesant éprouve une poussée de bas en haut égale en grandeur au poids du gaz déplacé.

Ce principe s'applique, en particulier, aux corps placés à la surface du globe, et environnés par l'atmosphère terrestre. — Il en résulte que tout corps dont le poids surpasse celui de l'air déplacé, tend à tomber comme s'il était sollicité par une force unique, son *poids apparent dans l'air*, qui est l'excès de son poids réel sur le poids du gaz déplacé. Ce cas est celui de tous les corps solides ou liquides. — On exprime encore quelquefois le même principe par l'énoncé suivant, facile à comprendre avec les explications qui précèdent : *Tout corps plongé dans l'air perd une partie de son poids égale au poid de l'air déplacé.*

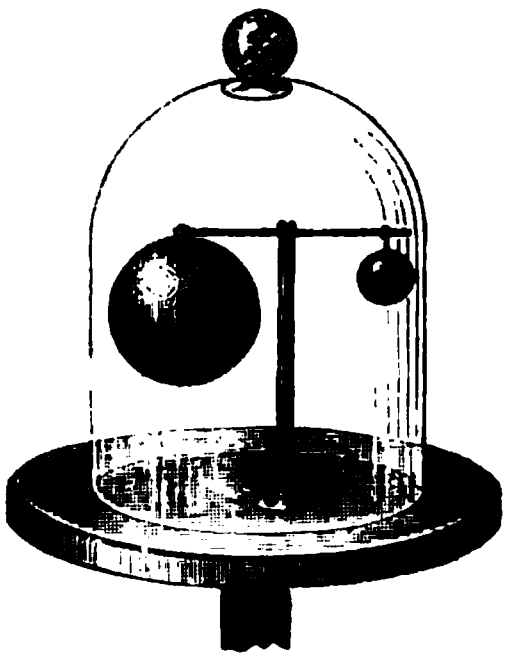


Fig. 141. — Baroscope.

Si le poids du corps est plus petit que celui de l'air déplacé, la poussée l'emporte et le corps s'élève, comme s'il était sollicité en sens contraire de la pesanteur par une force unique, égale à la différence qui existe entre la poussée et son propre poids. Tel est le cas des bulles de savon gonflées avec de l'hydrogène.

156. **Vérification expérimentale.** — La poussée de l'air sur les corps qui y sont plongés peut être rendue manifeste par l'expérience suivante

Aux deux extrémités d'un petit fléau de balance (*fig.* 141), sont suspen-

dues deux sphères métalliques creuses, dont les volumes sont très-inégaux, mais dont les poids sont peu différents; la virole qui soutient la petite sphère peut se mouvoir sur le fléau, et on en règle la distance au point de suspension, de façon que la tige se tienne horizontale lorsque l'appareil est placé dans l'air : après avoir ainsi préparé l'instrument, on le met sous une cloche, dans laquelle on fait le vide au moyen de la machine pneumatique. A mesure que l'air se raréfie, on voit le fléau s'incliner de plus en plus du côté de la grosse sphère; il redevient horizontal quand on laisse rentrer l'air sous la cloche. — On conçoit, en effet, qu'en enlevant l'air on fait disparaitre les poussées qu'il exerçait sur les deux sphères, et qui intervenaient dans l'équilibre horizontal du fléau; or, la poussée étant plus grande pour celle qui déplace le plus grand volume d'air, l'équilibre ne peut subsister dans le vide, et le fléau doit s'incliner du côté de la grosse sphère, comme le montre l'expérience. — Ce petit appareil, connu sous le nom de *baroscope*, avait été imaginé par Otto de Guericke pour servir à constater, par l'inclinaison du fléau, les variations de la pression atmosphérique.

157. **Corrections des pesées effectuées dans l'air.** — Tout corps plongé dans l'air éprouvant une poussée de bas en haut, les pesées qu'on exécute dans l'air sont affectées d'une erreur, si l'on n'a pas soin de leur faire subir une correction convenable (*) :

Désignons par x le *poids réel* du corps, c'est-à-dire son poids dans le vide. Soit P la somme des marques des poids échantillonnés qu'on a employés pour établir l'équilibre : la marque de chacun d'eux indique, comme on le sait, la valeur de ce poids dans le vide. La pesée ayant eu lieu dans l'air, nous allons écrire que les poids apparents du corps et des poids échantillonnés sont égaux. Soit D le poids spécifique du corps, Δ le poids spécifique du métal dont sont faits les poids, a le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau. Le volume du corps est $\frac{x}{D}$, le poids de l'air qu'il déplace est donc $\frac{x}{D}a$, et son poids apparent est $x - \frac{x}{D}a$, ou $x\left(1 - \frac{a}{D}\right)$. De même, la valeur apparente des poids marqués est $P\left(1 - \frac{a}{\Delta}\right)$. On a donc

$$x\left(1 - \frac{a}{D}\right) = P\left(1 - \frac{a}{\Delta}\right).$$

(*) Lorsqu'on pèse un corps solide ou liquide d'une grande densité, l'erreur est négligeable dans la plupart des cas; s'il s'agit, par exemple, d'un morceau de platine ayant un volume d'environ 1 centimètre cube, et pesant environ 23 grammes, l'erreur commise est, en valeur absolue, de $0^{gr},0013$ environ; l'erreur relative n'est donc que de $\frac{1}{18000}$ du poids du platine. — Pour des corps moins denses que le platine, cette erreur acquiert une importance plus grande.

On en tire

$$x = P\,\frac{1-\frac{a}{\Delta}}{1-\frac{a}{D}}.$$

Les densités D et Δ sont supposées connues ; quant à la densité de l'air extérieur a, lorsqu'il s'agit d'une pesée effectuée sur des corps solides ou liquides, on peut la remplacer par le nombre 0,0013, qui est la densité de l'air sous la pression de 760^{mm} et à la température de 0° ; en effet, dans ce cas, les *variations* que peut éprouver la poussée due à l'air, si la pression et la température s'éloignent un peu de ces valeurs, sont négligeables à côté du poids x qu'il s'agit de déterminer. — Au contraire, si le corps à peser était, par exemple, un gaz contenu dans un ballon de verre, la poussée de l'air serait du même ordre de grandeur que le poids lui-même : alors, les plus petites variations dans la densité de l'air extérieur ayant une influence appréciable, il deviendrait indispensable de remplacer a par la valeur de la densité de l'air *au moment de l'expérience*. Mais, dans ce dernier cas, il est encore préférable d'éviter cette correction, en employant une *tare compensée*, comme celle que nous aurons à indiquer en décrivant la méthode de M. Regnault pour la détermination de la densité des gaz.

Nous indiquerons aussi plus loin comment, on peut tenir compte de la poussée de l'air, pour effectuer d'une manière rigoureuse la détermination des poids spécifiques des corps solides ou liquides (livre II, chap. III).

158. **Aérostats.** — L'idée de construire des appareils s'élevant dans les airs, comme le liége et d'autres corps légers s'élèvent dans l'eau, et pouvant flotter dans ce gaz comme les nuages, remonte extrêmement loin dans l'histoire de la science. Mais les premières expériences couronnées de succès datent seulement de 1780 ; ce sont celles des frères Montgolfier (Joseph et Étienne), fabricants de papiers à Annonay. Elles furent faites avec des sacs de papier ou de toile, que l'on gonfla de gaz hydrogène, et qu'on vit monter dans les airs ; mais les gaz se perdaient rapidement, et les sacs retombaient bientôt vers la terre. — Les frères Montgolfier furent conduits alors à gonfler avec de l'air chaud un globe de toile, doublé de papier à l'intérieur et ayant presque 12 mètres de diamètre : le procédé consistait simplement à allumer un grand feu au-dessous d'une large ouverture, pratiquée à la partie inférieure. On vit le globe se distendre, et s'élever avec une force de plusieurs quintaux dès qu'on l'abandonna à lui-même. Au-dessous de l'ouverture de la *Montgolfière* avait été suspendu un panier en fil de fer, rempli de matières en combustion, pour entretenir la température de l'air intérieur.

Le bruit de ces expériences, faites dans le midi de la France (à Annonay et à Avignon), se répandit bientôt dans tout le royaume ; Étienne Montgolfier se mettait en voyage pour venir les répéter à Paris, lorsque le physi-

cien Charles, ignorant la nature du gaz employé, songea à essayer de nouveau l'hydrogène. Il en emplit un ballon de 4 mètres de diamètre, dont l'enveloppe était formée de taffetas, rendu imperméable au moyen d'un vernis de caoutchouc; l'expérience eut lieu au Champ de Mars et fut couronnée d'un plein succès : le ballon s'éleva rapidement, et franchit une distance de 5 lieues en trois quarts d'heure.

Étienne Montgolfier renouvela quelques semaines plus tard ses premières expériences à Versailles, avec un aérostat gonflé d'air chaud et plus grand que le précédent; cet aérostat s'éleva à un demi-kilomètre, emportant un mouton, un coq et un canard, dans une cage suspendue à l'appareil; la descente s'effectua sans accident, bien que deux larges déchirures se fussent produites dans l'enveloppe.

Enfin, Pilâtre des Rozier et le marquis d'Arlandes s'aventurèrent dans une nacelle suspendue à une montgolfière. On eut soin d'abord de la retenir captive au moyen d'une longue corde fixée à la terre; mais le 20 novembre 1783, l'appareil fut abandonné sans liens, et les deux aéronautes, après avoir entretenu quelque temps un feu de paille pour continuer de s'élever, allèrent descendre à 2 lieues du point de départ, ayant atteint dans leur ascension une hauteur de 1 kilomètre environ.

Les voyages se succédèrent alors rapidement, tantôt avec des aérostats gonflés par l'air chaud ou *montgolfières*, tantôt avec des appareils remplis d'hydrogène ou *ballons*. — Mais il y avait un danger trop réel à s'élever dans les airs, en emportant un feu ardent au-dessous d'une enveloppe très-combustible : aussi finit-on par renoncer complétement aux montgolfières, qui ne sont plus employées maintenant que dans le cas où l'aérostat doit être abandonné sans voyageurs.

159. On emploie aujourd'hui exclusivement, pour les ascensions aérostatiques, des *ballons* qu'on emplit de gaz hydrogène ou de gaz d'éclairage (*fig.* 142); l'enveloppe est formée soit de taffetas verni, soit d'une feuille mince de caoutchouc, placée entre deux feuilles de taffetas. A la partie inférieure, est une ouverture pour l'introduction du gaz; à la partie supérieure, une autre ouverture garnie d'une soupape, dont nous verrons plus loin l'usage. Ces ballons sont à peu près sphériques, ils sont couverts d'un filet, dont les cordes se prolongent en bas et supportent une nacelle destinée à recevoir les aéronautes, le lest, et tous les objets nécessaires au voyage.

160. **Force ascensionelle d'un aérostat.** — Pour qu'un aérostat, au moment où il quitte le sol, ou lorsqu'il s'est déjà élevé dans les airs, continue de monter, il faut que la poussée de l'air qui l'environne soit supérieure à son poids total. On donne le nom de *force ascensionnelle* à la différence qui existe entre ces deux quantités, à un instant déterminé. — On la détermine, au moment du départ, au moyen d'un dynamomètre, et on la règle, en graduant la charge de la nacelle, de manière qu'elle atteigne seulement quelques kilogrammes.

Il est important de considérer d'abord l'influence des dimensions de l'aérostat sur sa force ascensionnelle, puisque les accessoires peuvent être ensuite réglés en conséquence. — L'aérostat, sans aucun accessoire, aurait une force ascensionnelle égale à la différence des poids de l'air qu'il déplace et du gaz qu'il contient, diminuée encore du poids de l'enveloppe elle-même.

Fig 142.

Or le poids de l'air déplacé est proportionnel au volume de l'aérostat, c'est-à-dire au cube de son rayon ; il en est de même du poids du gaz extérieur, et par suite de la différence entre ces quantités : d'autre part, le poids de l'enveloppe de taffetas est proportionnel à la surface du ballon, c'est-à-dire seulement au carré du rayon. De là résulte que la force ascensionnelle croît avec le rayon de l'aérostat ; en d'autres termes, les poids additionnels que celui-ci peut enlever augmentent avec son volume.

En outre, pour un même ballon, la force ascensionnelle est beaucoup plus considérable si on le gonfle avec de l'hydrogène, que si l'on emploie du gaz d'éclairage, car la densité de l'hydrogène est environ $\frac{1}{15}$ de celle de l'air, tandis que celle du gaz d'éclairage en est la moitié. Aussi est-ce à

l'hydrogène que l'on a recours pour les ascensions scientifiques dans lesquelles on se propose d'atteindre à une très-grande hauteur dans l'atmosphère.

Il faut remarquer enfin que l'enveloppe doit être assez vaste pour que, au départ, le ballon ait acquis une force ascensionnelle suffisante avant d'être complétement distendu. En effet, si le volume du ballon ne pouvait plus s'accroître, il éprouverait, en arrivant dans les couches de l'atmosphère où la pression est moindre, un excès de pression intérieure : il pourrait alors éclater, comme les ampoules de verre autour desquelles on raréfie l'air sous le récipient de la machine pneumatique (28,3°).

161. **Variations de la force ascensionnelle pendant l'ascension.**—Si l'enveloppe a une capacité suffisante pour que le ballon continue à se distendre à mesure qu'il s'élève, le volume du gaz augmente en raison inverse de la pression extérieure; il en est donc de même du volume de l'air déplacé; mais, comme la densité de cet air diminue proportionnellement à la pression, le produit du volume de l'air par sa densité ne change pas, c'est-à-dire que la poussée éprouvée par l'aérostat demeure constante. — Ainsi, un ballon formé seulement d'une enveloppe mince, *parfaitement imperméable*, et n'emportant aucun accessoire, conserverait une force ascensionnelle *constante*. Pour un ballon muni de ses accessoires, la diminution de force ascensionnelle devrait être attribuée uniquement à la diminution de la poussée éprouvée, dans un milieu plus rare, par les corps *non gazeux* du système : il en résulte que l'aérostat conserverait très-longtemps une force ascensionnelle presque égale à celle qu'on lui aurait donnée au départ.

162. Mais l'hypothèse de l'imperméabilité de l'enveloppe est bien loin d'être réalisée, au moins dans la plupart des cas. L'expérience a montré qu'il s'opère le plus souvent, à travers les parois, un échange de gaz, duquel résulte que bientôt une partie de l'hydrogène s'est échappée dans l'atmosphère, et qu'une quantité d'air ayant un volume moindre et un poids plus grand a pénétré dans le ballon. De là une diminution dans la force ascensionnelle, incomparablement plus grande que celle qui serait due à la cause précédente. Aussi est-on obligé, si l'on veut continuer à s'élever, de décharger la nacelle d'une partie du sable qui lui sert de lest. — On peut du reste vérifier si le ballon est animé d'un mouvement d'ascension, par l'observation du baromètre qui permet d'évaluer, à chaque instant, la hauteur à laquelle on est parvenu (134).

Lorsque l'aéronaute veut arrêter le mouvement d'ascension avant que le ballon arrive à se tenir de lui-même en équilibre, ou lorsqu'il veut opérer sa descente, il ouvre, à l'aide d'une corde qui se rend dans la nacelle, la soupape qui ferme l'ouverture supérieure ; il laisse ainsi échapper un peu de gaz, et le ballon commence à descendre. Si la chute est trop rapide, ou si l'aérostat paraît devoir toucher terre en un lieu qui présente quelque danger, on peut diminuer la vitesse ou même rendre au ballon son

mouvement d'ascension, en jetant une nouvelle quantité de lest, jusqu'à ce qu'il se trouve au-dessus d'une plaine où la descente puisse s'effectuer sans difficulté. Une ancre fixée à l'extrémité d'une longue corde sert ordinairement à prendre un point fixe sur le sol, et à amener successivement la nacelle jusqu'à terre (*).

163. **Calcul de la force ascensionnelle d'un aérostat.** — La force ascensionnelle peut être facilement déterminée *a priori* par le calcul, quand on connaît le volume du gaz introduit, le poids de l'enveloppe et des accessoires, et les conditions dans lesquelles se trouve l'air ambiant. Nous supposerons, par exemple, qu'il s'agisse d'un ballon gonflé avec l'hydrogène.

Le poids d'un mètre cube d'air, à 0 degré et sous la pression de 760^{mm}, est $1^{kil},3$; le poids d'un mètre cube d'hydrogène, dans les mêmes conditions, est $1^{kil},3 \times 0,0692$, ou sensiblement $0^{kil},09$. Soit V le volume du gaz introduit, exprimé en mètres cubes, sous la pression H de l'air environnant; soit de même v le volume en mètres cubes de tous les corps non gazeux du système, et p leurs poids. — Si nous admettons, pour plus de simplicité, que la température soit partout de 0 degré, il suffira, pour calculer le poids du gaz intérieur, de remarquer que le volume V, sous la pression de 760^{mm}, deviendrait $V\frac{H}{760}$; son poids est donc $0^{kil},09 \times V\frac{H}{760}$. Le poids de l'air déplacé par l'enveloppe est de même $1^{kil},3 \times V\frac{H}{760}$. Enfin, le poids de l'air déplacé par les corps non gazeux est $1^{kil},3 \times v\frac{H}{760}$. La force ascensionnelle cherchée est donc :

$$(1^{kil},3 - 0^{kil},09)\,V\frac{H}{760} + 1^{kil},3 \times v\frac{H}{760} - p.$$

(*) La figure 142 montre, suspendu aux flancs du ballon, un *parachute* avec lequel on peut effectuer la descente d'une autre façon. C'est une sorte de vaste parapluie, en étoffe très-résistante, et du contour duquel partent des cordes qui viennent s'attacher à une petite nacelle. — Si un accident survenu au ballon rend impossible la manœuvre de la descente ordinaire, l'aéronaute, après avoir installé le parachute fermé de manière que son axe soit bien vertical, et s'être placé lui-même dans la nacelle, coupe la corde qui attache encore le parachute au ballon. L'air, en s'engouffrant sous l'appareil, le fait ouvrir, et ralentit la chute par la résistance énorme qu'il lui oppose, à cause de sa grande surface. Une ouverture pratiquée au centre de cette espèce de dôme permet l'écoulement de l'air, et évite ainsi les oscillations, dangereuses pour l'aéronaute, qu'éprouverait l'appareil, si l'air qui afflue sous la voûte devait s'échapper par son contour.

Il est extrêmement rare qu'on soit obligé d'avoir recours à ce mode de descente, toujours plus hasardeux que le précédent. Aussi, le plus grand nombre des descentes en parachute effectuées jusqu'ici n'ont eu d'autre motif que le désir d'offrir un attrait de plus aux spectateurs, par l'émotion qu'inspirent toujours les premiers moments de la chute, l'appareil ne s'ouvrant jamais d'une manière tout à fait instantanée.

Si l'aérostat doit enlever des objets déterminés d'avance, en sorte que p et v soient connus, on égalera cette expression à 4 ou 5 kilogrammes, et l'on aura ainsi une équation d'où l'on tirera la valeur de V, ou le nombre de mètres cubes de gaz qu'il faut introduire dans le ballon. — L'enveloppe doit d'ailleurs avoir toujours une capacité supérieure, afin qu'elle puisse se distendre pendant l'ascension (160).

164. Comme question théorique, on peut encore se proposer de construire l'aérostat de façon qu'il arrive en équilibre à une hauteur déterminée dans l'atmosphère, sans que rien ait été changé à son poids. — Soit H′ la pression, approximativement connue (134), à cette hauteur, et V′ le volume de l'air correspondant, c'est-à-dire le volume que doit atteindre le ballon dans sa distension maximum ; la force ascensionnelle devant être nulle à ce moment, on aura :

$$(1^{kil},3 - 0^{kil},09)\,V'\frac{H'}{760} + 1^{kil},3 \times v\frac{H'}{760} - p = 0,$$

équation qui donnera le volume V′ du ballon distendu, exprimé en mètres cubes. Il sera d'ailleurs facile d'en déduire le volume de gaz qu'il faut y introduire, sous la pression qui s'exerce à la surface du sol au moment du départ.

CHAPITRE V

POMPES A GAZ ET A LIQUIDES — SIPHON

---

1. — POMPES SERVANT A RARÉFIER LES GAZ. — MACHINE PNEUMATIQUE.

165. C'est à Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg, que paraît due la première réalisation, en 1654, d'un instrument destiné à extraire l'air des appareils, ou d'une *pompe à gaz*. Cet instrument était d'abord d'une simplicité extrême : parmi ceux qui se trouvent dans nos laboratoires, celui qui s'en rapproche le plus est la *pompe à main*, dont les chimistes surtout font un fréquent usage.

166. **Pompe à main.** — La pompe à main se compose d'un tube cylindrique de métal ou *corps de pompe* MN (*fig.* 145), dans lequel se meut un *piston* P garni de cuir ; ce piston est mis en mouvement par une tige T munie d'une poignée. A la partie inférieure du corps de pompe sont deux tubes latéraux A, C, contenant chacun une *soupape* formée d'un petit tronc de cône métallique, qui peut entrer exactement dans une cavité pratiquée dans l'axe du tube : chacun de ces troncs de cône porte une petite tige métallique, entourée d'un ressort spiral qui tend à le maintenir faiblement appliqué dans cette cavité. La figure montre que ces soupapes sont placées de façon à pouvoir s'ouvrir, l'une *a* sous l'influence d'un excès de pression à l'intérieur du corps de pompe, l'autre *c* par un excès de pression à l'extérieur. Supposons que C soit mis en communication, par un tube de plomb, avec un ballon contenant de l'air à la pression atmosphérique ; si l'on soulève le piston, la pression diminue dans le corps de pompe : la soupape *a* est maintenue fermée par la pression extérieure, et la soupape *c* s'ouvre pour laisser le gaz du ballon se répandre en partie dans le corps de pompe ; puis, quand on fait descendre le piston, il comprime le gaz contenu dans le corps de pompe ; *c* se ferme, et *a* s'ouvre pour laisser échapper ce gaz à l'extérieur. En continuant ainsi, chaque

allée et venue, ou chaque *coup de piston*, enlève une fraction de l'air contenu dans le ballon (*).

167. Machine pneumatique. — La machine pneumatique, successivement transformée par les modifications que lui ont fait subir le physicien anglais Boyle, le mécanicien français Papin et un grand nombre d'autres, est construite aujourd'hui de la manière suivante :

Deux corps de pompe en cristal C et C′ (*fig.* 145) travaillés avec le plus grand soin pour que l'intérieur soit parfaitement cylindrique, et contenant chacun un piston, communiquent par leur partie inférieure avec un seul et même conduit en fonte A, qui vient s'ouvrir en O au centre d'un plateau *pp* ou *platine*; celle-ci est formée d'une plaque circulaire de cristal, bien dressée, c'est-à-dire usée à l'émeri de façon que sa face supérieure soit bien plane. Lorsqu'on veut mettre un objet quelconque dans le vide, on le place sur la platine, et on

Fig. 145. — Pompe à main.

(*) Le robinet R′ peut servir, quand on arrête l'opération, soit à intercepter la communication entre la pompe et le ballon où l'on a fait le vide, soit à laisser rentrer l'air. Pour cela, on a fixé perpendiculairement au tube C un tube horizontal D, comme le montre la projection horizontale de cette partie de l'appareil (*fig* 144); le robinet est percé de deux voies perpendiculaires, s'embranchant en forme de T l'une sur l'autre, comme les deux traits noirs tracés sur la clef du robinet : si le robinet est placé dans la position de la figure 144, la communication avec le ballon est interrompue, mais l'air peut rentrer dans la pompe ; si on le tourne d'un quart de circonférence, dans le sens du mouvement des aiguilles d'une

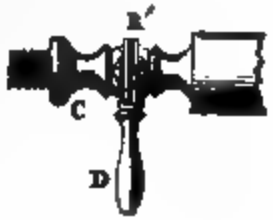


Fig. 144.

Fig. 145. — Machine pneumatique.

montre, l'air rentre à la fois dans le ballon et dans la pompe; enfin, si on lui fait décrire encore une demi-circonférence, la communication entre le ballon et la pompe est simplement établie, comme par un robinet ordinaire.

le couvre d'une cloche R dont les bords, également dressés, ont été enduits de suif pour qu'il ne reste aucun interstice entre eux et la platine : cette cloche prend le nom de *récipient* de la machine. Enfin l'extrémité O du conduit porte un pas de vis, sur lequel on peut fixer les appareils d'où l'on veut enlever l'air, ou les tubes qui servent à établir la communication entre la machine et les appareils qu'on ne peut y adapter directement.

Les deux corps de pompe étant semblables, il nous suffira de décrire l'un d'eux. Le piston est formé de rondelles de cuir circulaires, pressées

Fig. 146. — Coupe verticale des corps de pompe et des pistons.

entre deux plaques métalliques *dd'*, *ee'* (*fig.* 146) qu'on serre au moyen de l'écrou *ff'* pour appliquer le cuir sur la paroi intérieure du corps de

pompe. La pièce métallique qui relie entre elles ces plaques est creusée, suivant l'axe du piston, d'un canal qui communique avec l'extérieur, et dans lequel est placée une soupape formée par un petit disque de métal *g*, qui s'appuie sur les bords de l'ouverture *a*; un ressort à boudin s'enroule autour d'une tige fixée perpendiculairement à ce disque, et le maintient faiblement appliqué sur cette ouverture. Enfin le piston est traversé par une tige métallique *hh*, qui y passe à frottement dur, c'est-à-dire de façon que le piston entraîne d'abord avec lui la tige dans ses mouvements, mais qu'il puisse glisser sur elle quand elle vient à s'appuyer sur un point fixe; cette tige porte à sa partie inférieure un bouchon conique qui s'engage exactement dans l'entrée *b* du conduit, et à sa partie supérieure un petit arrêt *i*, qui vient buter contre la base supérieure du corps de pompe dès que la tige est un peu soulevée.

Chaque piston est mis-en mouvement par une tige à crémaillière T, qui engrène avec une roue dentée; cette roue est placée dans l'intérieur de la pièce métallique qui surmonte les deux cylindres; on la met en mouvement à l'aide d'une manivelle à deux branches munies de poignées, M, M′. La même roue engrenant avec les deux crémaillères T et T′, l'un des pistons s'élève toujours pendant que l'autre s'abaisse.

168. **Jeu de la machine.** — Supposons que l'un des pistons, d'abord appliqué sur le fond du corps de pompe, vienne à être soulevé; c'est le mouvement qu'indique la figure 146 pour le piston de gauche P : le bouchon conique est soulevé un peu au-dessus de l'ouverture *b;* mais bientôt la tige vient butter par son arrêt *i* contre la base supérieure du corps de pompe, et le piston continue seul de monter; l'air contenu dans le récipient acquiert, en se répandant dans le corps de pompe un volume toujours croissant et par suite une force élastique décroissante; enfin, le disque *g* reste appliqué sur l'ouverture *a*, puisqu'il supporte en-dessus la pression atmosphérique qui est supérieure à la pression de l'air dans le récipient. — Supposons maintenant que le piston, arrivé au haut de sa course, soit abaissé : la tige *hh* sera entraînée, et le cône inférieur viendra presque immédiatement s'appliquer dans l'ouverture *b* et interrompre la communication entre le récipient et le corps de pompe; l'air enfermé dans le corps de pompe et comprimé par le piston soulèvera le disque *g* quand sa force élastique sera devenue supérieure à la pression atmosphérique, et il continuera de s'échapper par l'ouverture *a*, jusqu'à ce que le piston soit au bas de sa course (c'est le mouvement que suppose la figure pour le piston de droite P′). — Les mêmes phénomènes se reproduiront chaque fois qu'on fera monter et descendre l'un des pistons, c'est-à-dire à chaque coup de piston.

169. L'avantage qui résulte de l'emploi de deux corps de pompe est facile à concevoir. En effet, dans les machines à un seul corps de pompe, comme la pompe à main, on doit vaincre, chaque fois qu'on soulève le piston, une résistance égale à la différence des pressions exercées, d'une

part sur la face supérieure du piston par l'atmosphère, d'autre part sur la face inférieure par le gaz raréfié : le second terme de cette différence devenant rapidement assez faible, l'opération devient bientôt très-pénible, surtout quand l'effort est exercé directement sur une poignée adaptée à la tige du piston (*fig.* 145). Au contraire, dans la machine pneumatique, les deux pistons P et P′ supportent sur leurs faces supérieures la pression exercée par l'atmosphère : pour les faire mouvoir en sens contraire, on n'a donc à vaincre que la différence des pressions exercées sur leurs faces inférieures, laquelle résulte à chaque instant de la différence des forces élastiques de l'air dans les deux corps de pompe (*). — Enfin, l'effort de l'opérateur, exercé sur les poignées M,M′ (*fig.* 146), produit sur la tige, au point où celle-ci engrène avec la roue dentée, une force égale à cet effort multiplié par le rapport de la longueur du bras de levier au rayon de la roue. — Pour ces diverses raisons, on peut donner aux corps de pompe une section assez considérable, sans que la manœuvre de la machine soit trop pénible.

170. **Degré de vide possible.** — Chaque fois qu'on fait monter l'un des pistons, une fraction de l'air du récipient passe dans le corps de pompe; elle en est expulsée quand le piston redescend : on n'enlève donc, à chaque coup de piston, qu'une fraction de l'air qui était resté au coup de piston précédent. — Donc, même en supposant la machine parfaite, il serait impossible d'enlever jamais tout l'air du récipient; cependant *théoriquement* il devrait y avoir toujours avantage à continuer de faire fonctionner la machine.

Mais, quelque soin qu'on ait mis à ajuster les bases des corps de pompe, les surfaces des pistons et les cônes qui bouchent les conduits, il reste inévitablement sous les pistons, quand ils sont appliqués sur le fond de leurs corps de pompe, de petites cavités où peut se loger l'air, et qu'on a nommées l'*espace nuisible*. Or, si la force élastique a été rendue assez petite, par l'ascension du piston, pour que l'air qui occupe alors tout le corps de pompe, puisse être ensuite réduit au volume de l'espace nuisible sans acquérir une force élastique supérieure à la pression atmosphérique, le disque *g* cesse de se soulever, et l'air ne s'échappe plus au dehors. — Il existe donc *pratiquement* une force élastique minimum, et, lorsqu'on l'a atteinte, si la machine ne présentait pas d'autre imperfection, il n'y aurait aucun avantage à la faire fonctionner plus longtemps. Dans les bonnes machines, cette force élastique est d'environ 1 ou 2 millimètres de mercure.

Enfin, il faut remarquer qu'il s'établit toujours, entre les différentes pièces mobiles de la machine, des fuites par lesquelles l'air exté-

(*) Quand on approche du terme de l'opération, et que l'un des pistons est presque au bas de sa course, la différence de ces pressions est presque égale à une atmosphère ; mais le chemin qui reste à parcourir est très-petit, et par suite le travail à développer (25) est très-peu considérable.

rieur tend à rentrer. La limite de raréfaction est alors beaucoup moins reculée; elle est atteinte dès que la quantité d'air qui rentre, pendant un temps donné, est égale à celle que la machine expulse pendant le même temps.

171. **Calcul de la force élastique, après un nombre déterminé de coups de pistons.** — On peut se proposer, comme exercice, de calculer la force élastique de l'air qui reste dans le récipient après chaque coup de piston, et, en tenant compte de l'espace nuisible, de déterminer la plus petite valeur qu'elle puisse atteindre.

Soit V le volume du récipient et des conduits, v le volume du corps de pompe quand le piston est au haut de sa course, H la pression atmosphérique. Quand on soulève pour la première fois le piston, l'air, qui occupait le volume V sous la pression H, occupe le volume $V + v$; si donc on désigne par h_1 sa pression à ce moment, elle doit satisfaire, d'après la loi de Mariotte, à la relation

$$\frac{h_1}{H} = \frac{V}{V+v}; \quad \text{d'où} \quad h_1 = H\frac{V}{V+v}.$$

Donc, pour obtenir la force élastique après le premier coup de piston, il suffit de multiplier la force élastique que possédait l'air avant ce coup de piston, par la fraction $\frac{V}{V+v}$. De même, pour obtenir la pression h_2 après le deuxième coup de piston, il suffit de multiplier cette valeur de h_1 par $\frac{V}{V+v}$, ce qui donne $H\left(\frac{V}{V+v}\right)^2$, et ainsi de suite. Donc, en général, en désignant par h_n la force élastique de l'air qui reste après n coups de piston, on a

$$h_n = H\left(\frac{V}{V+v}\right)^n \qquad (1)$$

La fraction $\frac{V}{V+v}$ étant plus petite que l'unité, les valeurs successives de h_n vont en décroissant à mesure que n augmente; donc, en supposant la machine parfaite, il y aurait toujours avantage à donner un plus grand nombre de coups de piston, et la force élastique, sans devenir jamais nulle, pourrait devenir aussi petite qu'on voudrait.

Si l'on tient compte de l'espace nuisible, on voit que la machine cesse de fonctionner lorsque l'air enfermé dans le corps de pompe n'atteint la force élastique H qu'au moment où le piston arrive au bas de sa course; cet air occupe alors le volume u de l'espace nuisible. — Soit f la force élastique qu'il avait quand il occupait le corps de pompe tout entier, c'est-à-dire la force élastique dans le récipient au même moment, ou la limite de raréfaction cherchée; la loi de Mariotte donne la relation

$$\frac{f}{H} = \frac{u}{v}, \quad \text{d'où} \quad f = H\frac{u}{v}$$

Cette force élastique limite est donc d'autant plus petite que le rapport du volume de l'espace nuisible à celui du corps de pompe est plus petit lui-même (*).

172. **Manomètre de la machine.** — Les machines pneumatiques portent toujours un manomètre à mercure, destiné à faire connaître la force élastique de l'air qui reste dans le récipient. Dans les machines modernes, c'est un tube de verre à deux branches M, N (*fig.* 149), dont l'une M est fermée, et qu'on nomme *baromètre tronqué;* on l'a en effet rempli de mercure comme un baromètre à siphon, mais, les branches n'ayant guère que 2 décimètres environ, quand la pression de l'atmosphère s'exerce dans la branche ouverte, le liquide reste appliqué contre le sommet de la branche fermée. Le tube est fixé sur une plaque de métal, et contenu dans une cloche de verre ou *éprouvette*, qui est mise en communication avec le conduit par le robinet E. Quand la pression dans la machine est devenue suffisamment petite, le mercure commence à descendre dans la branche MQ et à s'élever dans l'autre ; si la pression devenait nulle, les deux niveaux se placeraient sur un même plan horizontal *xy*. Nous avons vu qu'il n'en peut jamais être ainsi : on mesure la

(*) *Perfectionnement de M. Babinet.* — Pour reculer encore davantage la limite de raréfaction, on adapte à un grand nombre de machines une pièce particulière, dont l'idée est due à M. Babinet : c'est un robinet placé au point où les conduits des deux corps de pompe se réunissent, et dont on a indiqué (*fig.* 147 et 148) la section perpendiculaire à l'axe : la figure montre suffisamment les diverses voies qui y sont pratiquées, soit dans le plan du dessin, soit en arrière de ce plan, et, en outre, l'ouverture

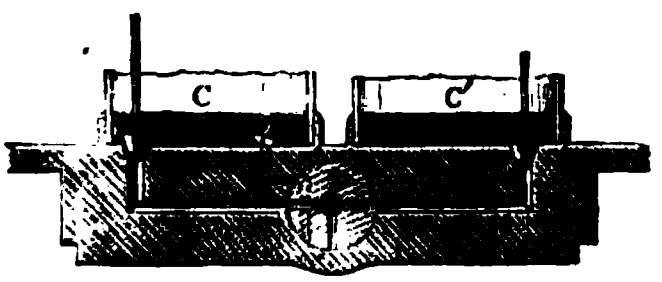


Fig. 147.

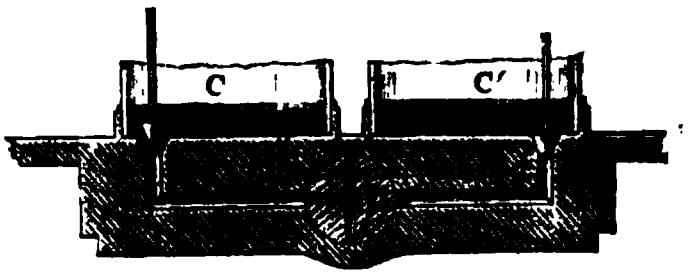


Fig. 148.

d'une voie longitudinale partant du point D et se continuant en arrière avec le conduit de la platine. Lorsque ce robinet est dans la position indiquée par la figure 147, tout se passe comme s'il n'existait pas ; mais, quand on est arrivé à la limite de raréfaction, si on le tourne d'un quart de circonférence, de manière à l'amener dans la position de la figure 148, la base du corps de pompe C se trouve mise en communication permanente avec le conduit qui aboutit au corps de pompe C' par le petit canal accessoire *rpt* qui est alors ouvert : on voit en outre que, des deux corps de pompe, C communique seul avec le récipient. Dès lors, quand on élève le piston de C, l'air du récipient passe dans ce corps de pompe, et quand on l'abaisse, une fraction de cet air est chassé en C' ; quand on abaisse ensuite le piston de C', cette fraction y reste renfermée. Il en est de même aux coups de piston suivants, en sorte que le gaz qui est ainsi refoulé en C' acquiert bientôt dans l'espace nuisible une force élastique suffisante pour soulever la soupape. La machine continue donc de fonctionner quelque temps, mais bientôt le disque ne se soulève qu'après plusieurs allées et venues du piston, et il finit par rester encore appliqué sur l'ouverture. — Dans les machines bien construites et qui portent ce perfectionnement, on peut amener l'air à n'avoir plus dans le récipient qu'une force élastique de deux ou trois millimètres de mercure.

colonne de mercure *mn* qui exprime la force élastique de l'air restant, comme on l'a fait pour le baromètre à siphon, au moyen de deux échelles dont le zéro commun est dans le plan *xy* (*).

173. **Clef de la machine.** — Il est souvent nécessaire, quand on a fait le vide, de le maintenir quelque temps dans le récipient : il faut donc empêcher l'air qui rentre par les corps de pompe de pénétrer dans les conduits. D'autre part, la pression atmosphérique tendant à faire passer entre les pistons et les corps de pompe une certaine quantité d'huile qui pourrait obstruer les conduits, il est utile de pouvoir laisser librement rentrer l'air dans les corps de pompe. Enfin, quand l'expérience est terminée, il faut pouvoir rendre l'air au récipient. — Ces diverses opérations s'effectuent au moyen de la *clef* de la machine.

La clef est un robinet D placé sur le conduit A de la figure 145 ; on y a pratiqué d'abord la voie ordinaire, qui établit la communication entre le récipient et les corps de pompe quand le robinet est ouvert (*fig.* 150) : il présente, en outre, un petit conduit longitudinal *m*, courbé à angle droit, comme le montrent les figures 151 et 152, et destiné à servir seulement quand le robinet est fermé; on peut alors, en enlevant la cheville K, laisser rentrer l'air, soit dans les corps de pompe (*fig.* 151),

Fig. 149.

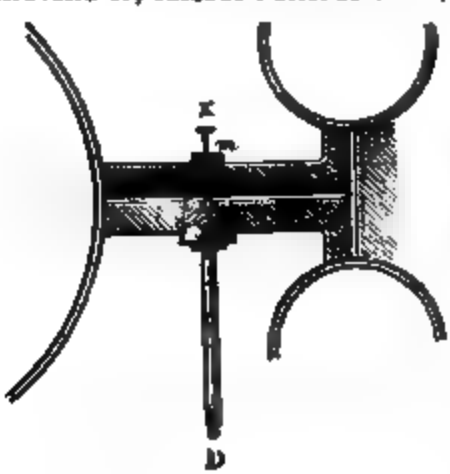


Fig. 150.

Fig. 151.

Fig. 152.

soit dans le récipient (*fig.* 152), selon la façon dont le robinet est tourné. Pour amener la clef dans l'une de ces trois positions, l'expérimentateur la

(*) On peut remarquer sur la branche fermée un étranglement *l*, près de son extrémité : il est destiné à ralentir l'ascension du mercure, quand on laisse rentrer l'air dans les conduits ; sans cette précaution, le sommet de la colonne de mercure viendrait frapper sur le verre un coup sec, qui pourrait en déterminer la rupture.

fait tourner de manière à lire en dessus l'une des trois lettres suivantes, gravées sur le métal :

O — Conduit *ouvert*.
F — Conduit *fermé* (on peut rendre l'air dans les corps de pompe).
R — Rentrée de l'air dans le récipient.

Dans les machines qui sont munies du robinet de M. Babinet, cette pièce est souvent disposée de manière à faire fonction de clef.

* 174. **Machine pneumatique de M. Bianchi.** — La machine pneumatique de M. Bianchi, dont la figure 153 représente une vue perspective, est une pompe à *double effet* ; bien qu'à un seul cylindre, elle offre tous les

Fig. 153. — Machine pneumatique de M. Bianchi.

avantages des machines à deux corps de pompe. Le piston est mis en mouvement par la rotation du volant V, qui se transmet aux roues dentées *r* et R, et imprime un mouvement de va-et-vient à la tige T, par l'intermédiaire de la manivelle B : en même temps, le cylindre oscille autour de l'axe MN, et accompagne l'extrémité de B, qui est maintenue entre des glissières. Le poids du volant régularise la vitesse de la rotation.

Le cylindre est mis en communication avec les divers appareils dans lesquels on veut raréfier l'air, au moyen d'un tube de caoutchouc, assez épais pour qu'il ne s'écrase pas lorsqu'on y fait le vide; on adapte ce tube sur l'extrémité N du canal qui est pratiquée dans l'axe MN. — L'air du récipient arrive dans le cylindre, soit par *a*, soit par *a'* (*fig.* 154), et chacune de ces ouvertures est alternativement bouchée par l'un ou l'autre des cônes qui terminent la tige glissante *aa'*; enfin, on voit en *b* et *b'* deux soupapes semblables aux soupapes intérieures des pistons de la machine ordinaire.

Fig. 154

La figure 154 suppose que le piston descende : l'air du récipient arrive alors à la partie supérieure par le tube C et par l'ouverture *a'*; en même temps, l'air qui se trouve au-dessous du piston est chassé par *b* et s'échappe par la capacité intérieure de la tige T. — Au contraire, quand le piston monte, *a'* se ferme, et l'air emprisonné au-dessus du piston est chassé par *b'*; en même temps, l'air du récipient arrive à la partie inférieure par l'ouverture *a*, et la soupape *b* est maintenue fermée par la pression atmosphérique. — On voit donc que les deux parties du cylindre séparées par le piston fonctionnent, simultanément et en sens inverse, comme le feraient les deux corps de pompe d'une machine pneumatique ordinaire. Elle présente également l'avantage des machines à deux corps de pompe, au point de vue de la grandeur de l'effort à vaincre, puisque la pression de l'atmosphère ne s'exerce jamais sur aucune des faces du piston (*).

(*) On verse l'huile dont on doit garnir les cuirs du piston dans une petite capsule

Le cylindre étant en fonte, on peut lui donner des dimensions aussi grandes qu'on le désire, et l'emploi d'un volant offrant un rayon assez grand permet de vaincre la résistance, qui est assez considérable à cause de la grande surface des bases du piston. — La machine peut faire très-rapidement le vide dans de vastes appareils.

175. **Machine pneumatique à mercure.** — La machine pneumatique à mercure, construite d'abord par M. Geissler, et successivement perfectionnée en France par M. Alvergniat, est destinée à effectuer, dans des appareils remplis de divers gaz, une raréfaction beaucoup plus parfaite que ne peut le faire la machine pneumatique ordinaire. — La figure 155 représente l'une des dispositions les plus satisfaisantes.

Le tube T, renflé à sa partie supérieure, doit fonctionner comme une sorte de tube barométrique, dont la chambre sera la capacité A ; il est mis en communication, par un gros tube de caoutchouc B, avec une cuvette C s'ouvrant à l'air libre. Ce tube T occupe, ainsi que tout le système de tubes de verre qui est figuré au-dessus et à gauche, une position fixe sur la planche verticale qui le supporte; la cuvette C peut, au contraire, être amenée, à volonté, au moyen de la chaine métallique PQ et des roues dentées que commande le volant V, soit à la partie supérieure, soit à la partie inférieure de l'appareil : il suffit pour cela de faire tourner le volant V dans un sens ou dans l'autre, en agissant sur la manette M, et de fixer ensuite le système des roues dentées, au moyen d'un arrêt convenablement disposé, quand on a amené la cuvette dans la position voulue. Le robinet R, qui surmonte la capacité A, est un robinet à trois voies, dont la figure 156 représente la section, et qui occupera, pendant la manœuvre, deux positions différentes, R_1 et R_2 : lorsqu'il est dans la position R_2, il établit la communication entre la capacité A du tube barométrique et le système de tubes qui est à la partie supérieure; dans la position R_1, il intercepte cette communication, mais il fait communiquer A avec le tube latéral qui se termine par une petite cuvette pleine de mercure G (*).

Avant d'employer la machine pour le but que l'on se propose, on commence par chasser tout l'air que contient le tube barométrique. Pour cela, on met le robinet R dans la position R_1, et on amène la cuvette C à la partie supérieure de sa course : le mercure s'écoulant de C vers A comprime cet air, et, quand la masse liquide est arrivée à l'équilibre, le gaz compris entre la surface du mercure et le robinet S est à une pression su-

circulaire G, disposée à la partie supérieure de la tige : la figure 154 montre que cette huile peut pénétrer dans l'espace annulaire qui est ménagé autour du canal intérieur T, et arriver ainsi jusqu'à la surface même des cuirs.

(*) Le robinet intermédiaire K, qui est représenté sur la figure 155 entre la capacité A et le robinet R, est ouvert d'une manière permanente pendant la manœuvre; il sert uniquement à fermer la capacité A lorsque, la machine ayant fonctionné pendant un certain temps, on veut enlever le robinet R pour renouveler la petite couche de matière grasse qui en facilite le mouvement, sans laisser rentrer de l'air humide dans le tube A.

périeure à la pression atmosphérique. On ouvre alors doucement le robinet S, de manière à livrer à cet air, qui s'échappe tmosphère en traversant lle G ; le mercure du sys- BA arrive ainsi à remplir lement la cavité A, jus- obinet S. On ferme S, et, nt descendre la cuvette C u bas de sa course, on ine l'écoulement du mer- sens inverse, c'est-à-dire ers C, ce qui produit un ométrique dans toute la upérieure de A, et la ma- st préparée pour l'opé- ue l'on a en vue.

ppareils dans lesquels on ose de faire le vide, et iennent un gaz qu'on a ablement raréfier avec la pneumatique ordinaire, en communication avec

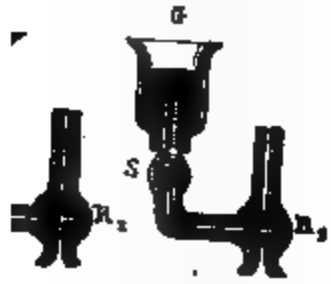


Fig. 156.

a. La manœuvre con- s dans la série suivante ons. — On met le robinet R dans la position R_2 (*fig.* 156), et en ouvrant les robinets *f* et *c*, on détermine le passage d'une partie du gaz des appareils dans la chambre barométrique : on remarquera d'ailleurs

Fig. 155. — Machine pneumatique à mercure.

que l'arrivée de ce gaz dans la chambre a pour effet de faire descendre le niveau du mercure, dans le tube barométrique, d'une certaine quantité, et d'accroître ainsi l'espace dans lequel ce gaz lui-même est aspiré. Lorsque le mercure a pris un nouvel équilibre dans le système de tubes ABC, on remet le robinet R dans la position R_1, on ramène la cuvette C à la partie supérieure de sa course, pour comprimer le gaz enfermé dans le renflement A, et enfin on fait échapper ce gaz dans l'atmosphère en ouvrant le robinet S. — En répétant la même manœuvre, on fait passer, à chaque fois, une certaine partie du gaz des appareils dans la machine, et de la machine dans l'atmosphère. On arrive ainsi à obtenir une pression tellement faible, que le baromètre tronqué *m* n'indique plus qu'une différence inappréciable entre les niveaux du mercure dans ses deux branches (*).

Fig. 157. — Jet d'eau dans le vide.

176. **Expériences fondées sur la raréfaction de l'air.** — Longtemps avant que la machine pneumatique fût arrivée à l'état de perfection actuel, on avait pu, en raréfiant l'air avec la pompe d'Otto de Guericke ou avec des appareils analogues, exécuter un grand nombre d'expériences conduisant à des conclusions remarquables. — Nous en avons déjà cité quelques-unes. Ainsi, c'est à Otto de Guericke qu'on doit l'expérience des *hémisphères de Magdebourg* (124); celle du *crève-vessie* (*ibid.*) n'est qu'une modification d'une expérience du même physicien. L'expérience du *baroscope* (155), celle qui nous a servi à démontrer directement la *pesanteur de l'air* (117), furent également réalisées par lui. — On put aussi se convaincre que de petits animaux placés dans le vide y périssent promptement asphyxiés; qu'une bougie s'y éteint, et qu'on voit alors la fumée qui se dégage encore de la mèche tomber vers la partie inférieure.

(*) Le réservoir U, interposé entre la machine et les appareils, contient de l'acide sulfurique concentré, pour dessécher les gaz qui pénètrent dans la machine, de manière qu'elle reste toujours parfaitement sèche. — Tous les robinets sont *en verre*, et travaillés d'une manière assez parfaite pour tenir indéfiniment le vide, à la condition qu'on ait le soin de les maintenir enduits d'une couche très-légère de matière grasse. — Le ballon D, qui est figuré à gauche de l'appareil et dont il n'a pas été question dans la description, ne sert que dans des circonstances spéciales, celles où l'on veut faire le vide dans des appareils contenant un gaz qui attaquerait le mercure de la machine. ce ballon est alors utilisé comme une sorte de récipient intermédiaire, contenant de l'air raréfié jusqu'à la limite d'action de la machine, et dans lequel on aspire les gaz des appareils soumis à l'expérience.

Un peu plus tard, Boyle imagina l'expérience qui nous a permis de rendre sensible la force élastique des gaz (28). — A côté de cette expérience, on peut citer la suivante : on emplit d'eau à moitié un petit flacon, et on introduit dans le col un bouchon, traversé par un tube de verre qui est effilé à sa partie supérieure et qui plonge jusqu'au fond de l'eau par son autre extrémité. On le place sur la platine, on le couvre d'une cloche un peu élevée (*fig.* 157), et on raréfie l'air qui l'entoure. La force élastique du gaz qui est enfermé dans le flacon fait monter l'eau dans le tube, et on la voit jaillir avec force par l'extrémité effilée : cette expérience a été désignée sous le nom de *jet d'eau dans le vide*.

II. MACHINES SERVANT A COMPRIMER LES GAZ.

177. **Pompes servant à comprimer les gaz.** — La *pompe à main* (*fig.* 158), dont nous avons indiqué l'usage pour raréfier l'air, peut aussi servir à comprimer dans un appareil, soit de l'air, soit un gaz quelconque.

Il suffit, pour cela, de mettre le tube A en communication avec cet appareil, et de faire communiquer le tube C, soit avec l'atmosphère, soit avec le réservoir à gaz. La pompe étant ainsi installée, quand on soulève le piston, la soupape *c* s'ouvre pour donner accès à l'air ou au gaz dans le corps de pompe ; quand on appuie au contraire sur la tige, *a* s'ouvre à son tour dès que la force élastique intérieure surpasse celle qui s'exerce du côté A, et le gaz est refoulé dans l'appareil (*).

(*) Le robinet R présente une disposition toute semblable à celle qu'indique la figure 144 pour le robinet R' ; on peut donc, une fois l'opération terminée, laisser le gaz comprimé s'échapper dans l'atmosphère (*Voir* la note de la page 133).

Fig. 158. — Pompe à main.

178. **Machines de compression.** — On a construit et employé quelquefois une *machine de compression* à deux corps de pompe, semblable à la machine pneumatique, mais avec une disposition inverse des soupapes. — Cette machine est coûteuse, d'une manœuvre pénible, et ne donne jamais de bons résultats : en outre, elle ne peut pas servir à comprimer d'autres gaz que l'air.

Au contraire, en combinant plusieurs pompes semblables à la pompe à main, et les faisant manœuvrer au moyen d'un volant mis en mouvement par une petite machine à vapeur, M. Regnault a pu comprimer différents gaz jusqu'à 30 atmosphères : c'est là l'appareil dont il s'est servi dans ses recherches sur la loi de Mariotte, sur les forces élastiques des vapeurs, et sur la liquéfaction des gaz.

179. **Calcul de la compression, après un nombre déterminé de coups de pistons.** — Soit H la force élastique, supposée invariable, dans l'espace où la pompe puise le gaz ; H′ la force élastique initiale dans le récipient où elle le comprime, V le volume du récipient, et v celui du corps de pompe. — Chaque fois que le piston s'élève, le volume v s'emplit de gaz à la pression H ; quand il s'abaisse, ce gaz est refoulé dans le récipient et prend alors, sous le volume V, une force élastique $H\frac{v}{V}$, qui s'ajoute à la précédente (148). De là résulte que, si l'on désigne par H_1, H_2..., H_n, les forces élastiques dans le récipient après 1, 2, ... n coups de piston, on aura :

$$H_1 = H' + H\frac{v}{V},$$

$$H_2 = H' + 2H\frac{v}{V},$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$(1) \qquad H_n = H' + nH\frac{v}{V}.$$

Si l'on considère, en particulier, le cas où la pompe puise de l'air dans l'atmosphère, et le refoule dans un appareil contenant d'abord de l'air à la pression atmosphérique, on voit que l'on a $H' = H$; la force élastique, après n coups de piston, devient alors

$$(2) \qquad H_n = H\left(1 + \frac{nv}{V}\right).$$

180. **Limite de compression.** — L'une ou l'autre des formules (1) et (2) montre que la force élastique augmente d'une quantité proportionnelle au nombre n ; donc, *théoriquement*, et avec une pompe parfaite, la force élastique H_n peut devenir aussi grande qu'on veut, en donnant un nombre de coups de piston suffisamment grand. — Si l'on tient compte du volume u de l'espace nuisible, on trouve, en raisonnant comme pré-

cédemment (171), que la force élastique dans le récipient ne peut dépasser une limite f, qui est

$$f = H\frac{v}{u}.$$

Enfin, dans la plupart des cas, les fuites qui se produisent dans l'appareil empêchent de continuer à accroître la pression, bien avant que cette limite soit atteinte.

181. **Applications de la compression des gaz. — Fontaine de compression.** —Cet appareil se compose d'un réservoir métallique à parois très-résistantes (*fig.* 159); dans l'axe de ce réservoir, est un tube qui

Fig. 159. — Fontaine de compression. Fig. 160. — Fontaine de Héron.

pénètre presque jusqu'au fond, et qui est muni d'un robinet à son extrémité supérieure. On introduit d'abord de l'eau dans l'appareil (à peu près jusqu'au trait ponctué); puis, au moyen d'une pompe à main, on refoule de l'air dans le tube central : le gaz vient s'accumuler dans l'es-

pace qui surmonte la surface du liquide, et y acquiert une force élastique considérable. On ferme le robinet, on enlève la pompe, et l'on adapte sur le tube un ajutage présentant une ou plusieurs ouvertures étroites. Si l'on ouvre alors le robinet, on voit l'eau jaillir á une grande hauteur, à cause de l'excès de la pression intérieure sur la pression atmosphérique. Cette expérience présente, comme il est facile de le voir, une analogie frappante avec celle du jet d'eau dans le vide (176).

C'est par une méthode semblable qu'on prépare dans l'industrie les eaux gazeuses artificielles : la pompe de compression, au lieu de puiser de l'air dans l'atmosphère, communique avec un réservoir d'acide carbonique et refoule ce gaz dans l'eau, où il se dissout en quantité d'autant plus grande que sa pression est rendue plus considérable (151).

182. **Fontaine de Héron.** — C'est encore la force élastique de l'air comprimé qui produit le jet d'eau dans la fontaine de Héron (*fig.* 160). — Au commencement de l'expérience, le réservoir A est à peu près plein d'eau; on a aussi versé de l'eau dans la cuvette qui le surmonte. Du fond de la cuvette, part un tube *ab*, qui plonge jusqu'au fond du réservoir inférieur B; l'eau est donc d'abord descendue par ce tube, enfermant ainsi dans la boule B de l'air, et lui faisant acquérir une force élastique égale à la somme de la pression atmosphérique et de la pression due à la colonne d'eau *a*B. Cette force élastique se transmet, par le tube *cd*, à l'air du réservoir A, en sorte que l'eau est refoulée dans le tube central et jaillit par l'orifice *s*. On voit que la hauteur du jet, au-dessus de la surface A, doit être à peu près égale à la hauteur de l'eau de la cuvette au-dessus de la surface B. — L'expérience dure jusqu'au moment où, tout le liquide de A ayant passé dans la cuvette et de là dans la boule B, le jet d'eau cesse, et l'air comprimé s'échappe par l'ouverture *s*.

III. — POMPES A LIQUIDES.

183. **Diverses espèces de pompes à liquides.** — Longtemps avant d'être appliquées à la raréfaction ou à la compression des gaz, les pompes avaient été employées à élever l'eau : il nous reste encore à les étudier sous ce point de vue.

Les pompes à eau peuvent être rapportées à trois types principaux : la *pompe aspirante*, la *pompe foulante* et la *pompe aspirante et foulante*.

184. **Pompe aspirante.** — Elle se compose d'un *corps de pompe* CC (*fig.* 161) dans lequel se meut un piston P, et qui porte un *tuyau de déversement* D à sa partie supérieure; un *tuyau d'aspiration* T descend du corps de pompe dans le *puisard mn* dont il doit élever l'eau. A la jonction du corps de pompe et du tuyau d'aspiration est une soupape ou *clapet* S, représentée à part dans la figure 162; c'est une plaque métallique, garnie de cuir en dessous, et mobile autour d'une charnière. Le piston lui-

même est traversé, parallèlement à son axe, par deux ouvertures munies de soupapes s et s' (*fig.* 163); il est garni d'étoupes, sur sa surface convexe. La tige du piston s'articule ordinairement, par l'intermédiaire d'une bielle, avec un levier au moyen duquel on lui imprime un mouvement alternatif d'ascension et de descente; ce levier est représenté en ABC dans la figure 169 : CD est la bielle et DE la tige du piston.

Supposons la pompe (*fig.* 161) installée, le tuyau d'aspiration plein d'air à la pression atmosphérique, le piston au bas de sa course, et toutes les soupapes fermées. Soit mn le niveau de l'eau dans le puisard. — Si l'on vient à soulever le piston, il tend à faire le vide au-dessous de lui, dans le corps de pompe : les soupapes s et s', pressées de haut en bas par l'atmosphère, demeurent fermées; la soupape S se soulève, à cause de la force élastique de l'air contenu dans le tuyau d'aspiration. Cet air se répand dans le corps de pompe, et sa force élastique diminue à mesure que le piston s'élève; l'eau du puisard monte dans le tuyau d'aspiration, jusqu'à ce que la pression qu'elle exerce au niveau de mn, augmentée de celle qui est due à l'air intérieur, fasse équilibre à la pression atmosphérique. Admettons que l'eau n'atteigne pas encore la soupape S lorsque le piston parvient au sommet du corps de pompe; au moment où il s'arrête, l'équilibre de force élastique étant établi, la soupape S retombe par son poids. Si le piston redescend, il comprime l'air contenu dans le corps de pompe et lui fait bientôt acquérir une tension plus grande que celle de l'atmosphère; alors les soupapes s et s' se soulèvent et donnent passage à l'air intérieur, pendant toute la fin de la descente. Lorsque le piston arrive au fond du corps de pompe, ses deux soupapes retombent, et les choses se retrouvent dans le même état qu'au commencement, avec cette seule différence qu'une partie de l'air du tuyau d'aspiration a été expulsée, et que l'eau s'y est élevée à une certaine hauteur. Un deuxième coup de piston la fera monter davantage encore; il en sera de même du troisième, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'enfin l'eau atteigne la soupape S et pénètre dans le corps de pompe. A ce moment, la pompe est *amorcée*.

Fig. 162.

Fig. 163.

Fig. 161.
Pompe aspirante.

On continue alors à faire fonctionner le piston : chaque fois qu'il des-

cend, l'eau renfermée dans le corps de pompe passe au-dessus de lui, en soulevant les soupapes s et s' ; chaque fois que le piston remonte, il élève l'eau que supporte sa face supérieure et la fait couler par le tuyau D ; en même temps, il aspire celle du tuyau T et du puisard : cette eau traverse l'ouverture de la soupape S et vient remplir entièrement le corps de pompe. — On voit ainsi que, *à chaque ascension du piston*, il s'écoule, par l'orifice de déversement, un volume d'eau égal à la capacité du corps de pompe, tandis qu'un égal volume de liquide est pris dans le puisard et pénètre dans l'appareil.

Remarque. — Les explications précédentes supposent que, sous l'influence de la pression atmosphérique, l'eau du puisard puisse s'élever jusqu'au-dessus de la soupape S. Cette condition ne peut être remplie que si la distance verticale de la soupape au niveau *mn* est inférieure à $10^m,4$; on sait, en effet, que la pression de l'atmosphère équivaut à celle d'une colonne d'eau d'environ $10^m,4$ de hauteur. — Dans la pratique, l'eau ne peut même atteindre cette hauteur, à cause des imperfections que les pompes présentent toujours, et qui tiennent, soit à ce que le piston n'est pas en contact parfait avec le corps de la pompe en tous ses points, soit à ce que les soupapes ne ferment pas exactement les ouvertures qu'elles garnissent. L'expérience a montré que, dans les pompes les plus ordinairement employées, la hauteur du tuyau d'aspiration ne doit guère dépasser 8 mètres.

185. **Effort à employer pour faire manœuvrer la pompe.** — Proposons-nous d'estimer les pressions qui s'exercent sur les deux faces du piston, quand la pompe fonctionne régulièrement. — Pendant la descente, les soupapes s et s' étant ouvertes, il y a communication entre le liquide qui se trouve au-dessus et celui qui se trouve au-dessous du piston ; les pressions que supportent les deux faces de ce dernier sont donc sensiblement égales ; par suite, l'effort qu'il faut exercer pour faire descendre le piston est seulement employé à vaincre le frottement du piston lui-même contre les parois du corps de pompe, et aussi la résistance qu'éprouve le liquide à traverser les ouvertures pratiquées dans l'épaisseur du piston. — Pendant l'ascension, les soupapes s et s' sont fermées ; le piston supporte alors, sur sa face supérieure, une pression égale à celle de l'atmosphère, augmentée du poids de la colonne d'eau qui le surmonte ; sur sa face inférieure, il reçoit de bas en haut la pression de l'atmosphère, diminuée du poids d'une colonne d'eau ayant pour base le piston lui-même et pour hauteur sa distance au niveau *mn* ; la différence de ces deux pressions, ou la force qu'il faut développer pour soulever le piston, est donc égale au poids d'une colonne d'eau ayant pour base le piston et pour hauteur la distance verticale du tuyau D (*fig.* 161) au niveau de l'eau dans le puisard. — Cette force peut être aisément évaluée, si l'on connaît le rayon r du piston et la hauteur h du tuyau de déversement au-dessus du niveau *mn* ; sa valeur en kilogrammes est $\pi r^2 h$, r et h étant exprimés en décimè-

tion, lu, pour une pompe déterminée, $r = 4$ centimètres et $h = 6$ mètres, la force à exercer pour soutenir le piston, évaluée en kilogrammes, est de $3.1614 \times 4.16 \times 60$ ou de 240 kilogrammes. — On voit que cette force est en général assez considérable : elle doit augmenter, et souvent même beaucoup, de l'énergie par l'intermédiaire d'un levier.

186. **Pompe foulante.** — Dans la pompe foulante (*fig.* 164), le corps de pompe CC' est entièrement immergé dans l'eau du puisard, et communique, à sa partie inférieure, avec un *tuyau de refoulement* R, le piston P est un piston plein. — Quand on soulève ce piston, il tend à produire le vide au-dessous de lui : l'eau, par la pression qu'elle exerce en vertu de son poids, soulève alors la soupape S et vient emplir le corps de pompe. Quand le piston s'abaisse, cette soupape se ferme ; la pression exercée sur l'eau fait ouvrir la soupape s, le liquide pénètre dans le tuyau de refoulement R et s'y élève à une certaine hauteur. Après un certain nombre de coups de piston (un seul suffit quelquefois), elle atteint l'orifice extérieur du tuyau de refoulement. À partir de ce moment, la pompe débite, à chaque coup de piston, comme la pompe aspirante, un volume d'eau égal à la capacité du corps de pompe ; mais ici, le débit a lieu *pendant que le piston descend*, tandis que la pompe aspirante fournissait de l'eau pendant l'ascension.

Fig. 164. — *Pompe foulante.*

187. **Effort à employer.** — On verra, en raisonnant comme dans le cas précédent : 1° que l'effort à employer pour faire monter le piston de la pompe foulante est à peu près insignifiant ; 2° que, pour le faire descendre il faut lui appliquer une force au moins égale au poids d'une colonne d'eau ayant pour base la surface du piston, et pour hauteur la distance verticale de l'orifice d'écoulement au niveau de l'eau dans le puisard.

À ce dernier point de vue, les deux systèmes de pompes que nous venons d'étudier présentent une grande analogie ; mais il y a entre eux cette différence essentielle, que la pompe aspirante ne peut élever l'eau que jusqu'à une hauteur limitée, tandis que la pompe foulante, théoriquement du moins, peut la porter à une hauteur quelconque, pourvu qu'on applique au piston une force suffisante. — Dans la pratique, il y a toujours une limite, laquelle dépend de la résistance des parois de la pompe, et du contact plus ou moins parfait qui existe entre elles et le piston.

188. *Pompe à incendie.* — La pompe à incendie (*fig.* 165) est une pompe foulante. Elle présente, comme la machine pneumatique ordinaire, un système de deux corps de pompe accouplés ; ces deux corps de pompe sont établis l'un à côté de l'autre dans une même bâche de bois, qu'on a soin de maintenir constamment pleine d'eau pendant la manœuvre. Les

pistons *a*, *a*, sont mis en mouvement au moyen d'un fort levier OO, mobile autour d'un axe horizontal qui passe par son milieu; tandis que l'un d'eux s'élève, l'autre s'abaisse, et inversement. Au lieu d'envoyer l'eau directement dans le tuyau d'ascension, ils la refoulent dans un réservoir *e* qui contient de l'air; le tuyau d'ascension *dd* prend naissance à la partie inférieure de ce réservoir. Quand le piston de gauche descend, la soupape *b*

Fig. 165. — Pompe à incendie.

qui lui correspond se ferme, l'eau soulève la soupape *c*, et pénètre dans le réservoir *e*, dont elle comprime l'air; celui-ci réagit par son élasticité et pousse l'eau dans le tuyau d'ascension. Quand le piston de gauche remonte, c'est le piston de droite qui refoule le liquide dans le réservoir. L'air étant sans cesse comprimé, même aux instants où le mouvement des pistons change de sens, il en résulte un jet sensiblement régulier, condition importante à remplir dans les pompes à incendie. — Pour que le jet soit animé d'une grande vitesse, on termine le tuyau d'ascension par un tube de cuivre ou *lance*, dont l'orifice a un diamètre moindre que le tuyau lui-même.

189. **Pompe aspirante et foulante.** — Cette pompe est, comme son nom l'indique, une combinaison des deux précédentes. Son corps de pompe CC′ (*fig.* 166) s'emplit par aspiration lorsque le piston s'élève; il se vide quand le piston s'abaisse, et le liquide est alors poussé dans le tuyau de refoulement R. On voit donc que l'appareil fonctionne alternativement comme une pompe aspirante et comme une pompe foulante.

Lorsqu'on se propose d'élever l'eau à une très-grande hauteur, la pression énorme que supportent les couches en contact avec la base du piston tend à chasser le liquide à travers les interstices qui existent toujours entre les parois du corps de pompe et la surface latérale du piston : de là une notable perte de travail, et une diminution de la hauteur à laquelle l'eau peut être poussée. On obvie à ces inconvénients et l'on réalise une

fermeture beaucoup plus exacte, en remplaçant le piston ordinaire par un *piston plongeur*. La figure 167 représente un piston de cette espèce, formé d'un cylindre métallique A, dont la hauteur est beaucoup plus grande que le diamètre ; ce cylindre ne touche pas la paroi du corps de pompe, mais il traverse une garniture d'étoupes, qui est adaptée à sa partie supérieure,

Fig 166.
Pompe aspirante et foulante.

Fig. 167. — Piston plongeur.

et qui reste fixe pendant le mouvement du piston. Quand le piston s'élève, les soupapes B s'ouvrent, et l'eau s'introduit par aspiration dans le corps de pompe ; quand il s'abaisse, c'est la soupape C qui livre passage à l'eau dont le piston prend la place (*).

190. **Pompe aspirante et élévatoire.** — On modifie quelquefois un peu la construction de la pompe aspirante, de manière à la rendre capable

(*) Pendant l'aspiration, la pression supportée par l'eau qui pénètre dans le corps de pompe étant moindre que celle de l'atmosphère, une portion de l'air dissous se dégage (151) ; au bout d'un certain temps, il s'en accumule ainsi une quantité assez considérable à l'entour du piston. La présence de ce gaz diminue le débit de la pompe, et peut même finir par le rendre tout à fait nul ; en effet, une partie de l'effort qu'on exerce sur le piston pour le faire descendre n'est plus employée qu'à comprimer l'air, et à accroître sa force élastique jusqu'à ce qu'elle devienne égale à la pression de la colonne d'eau soulevée dans le tuyau d'ascension ; c'est seulement alors que le liquide

d'élever l'eau à une hauteur plus ou moins grande dans un *tuyau d'ascension* E (*fig.* 168). On ferme alors corps de pompe à sa partie supérieu et l'on fait passer la tige du piston d une garniture d'étoupes fixe. A cha ascension, le piston aspire l'eau du p sard et élève dans le tuyau E celle est au-dessus de lui ; chaque fois q descend, la soupape S se ferme, e liquide traverse les orifices des soupa *s* et *s'*, tandis que son niveau deme immobile dans le tuyau d'ascension Cette pompe, qu'on nomme *aspira et élévatoire*, agit, en réalité, par as ration, et par refoulement : seuleme c'est pendant l'ascension du piston l'eau est refoulée dans le tube latéral, au lieu d'être refoulée pendant la descente comme dans la pompe qui précède.

On reconnaîtrait facilement que la force qu'il faut appliquer au piston, pour élever l'eau jusqu'au sommet du tuyau d'ascension, est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base la surface de ce piston et pour hauteur la distance verticale de l'orifice d'écoulement au niveau dans le puisard.

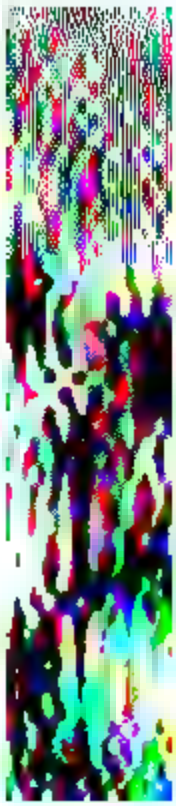


Fig. 168.

Fig. 169. — Pompe ménagère.

191. *Pompes ménagères.* — Les pompes destinées aux usages domestiques et dites *pompes ménagères* sont souvent disposées pour servir, à volonté, comme pompes simplement aspirantes, ou bien comme pompes

commence à être refoulé à travers la soupape C. Un petit conduit D, pratiqué dans l'épaisseur du piston et muni à sa partie supérieure d'un robinet E, sert à expulser, de temps en temps, l'air du corps de pompe ; il suffit pour cela, d'ouvrir le robinet pendant que le piston descend.

aspirantes et élévatoires. Dans celle que représente la figure 169, si le robinet K du tuyau de déversement est fermé, l'eau pénètre dans le tuyau d'ascension I et peut s'y élever à une hauteur plus ou moins considérable, par exemple jusqu'aux étages supérieurs d'un bâtiment.

192. *Épuisement des mines.* — Pour extraire des mines les eaux qui s'accumulent dans les galeries, on emploie en général un système de pompes élévatoires, établies à différentes hauteurs dans un puits vertical, et dont chacune puise l'eau dans la bâche où elle a été portée par la pompe qui est placée immédiatement au-dessous. Les tiges des pistons de toutes ces pompes sont fixées à une même tige, qui s'étend dans toute la hauteur du puits (la *maîtresse tige*), et qui reçoit son mouvement d'une machine à vapeur ou d'une machine hydraulique située à l'extérieur (*).

193. **Presse hydraulique.** — Nous retrouvons la pompe aspirante et foulante dans la presse hydraulique, dont nous n'avons indiqué jusqu'ici que le principe (68). — Telle qu'on l'emploie dans l'industrie, cette machine présente un certain nombre de pièces qu'il nous reste à faire connaître.

Les figures 170 et 171 donnent de la presse hydraulique, la première une vue d'ensemble, la seconde une coupe verticale. — En F (*fig.* 170)

Fig. 170. — Presse hydraulique.

est une pompe aspirante et foulante, à piston plongeur, que l'on fait jouer à l'aide du levier GH ; I (*fig.* 171) est le piston, M et N sont les soupapes de cette pompe ; elle puise l'eau dans un réservoir placé au-dessous,

(*) Cette disposition rend inutile l'emploi de pistons plongeurs, auxquels il faudrait nécessairement recourir si l'on voulait élever l'eau, d'un seul jet, à une grande hauteur, au moyen d'une pompe foulante unique ; elle permet aussi de n'employer à ce genre de service que des pompes assez grossières, puisque chacune d'elles ne doit élever l'eau qu'à une hauteur peu considérable.

et la refoule par le tuyau L dans le cylindre A. Ce cylindre, dont le diamètre est beaucoup plus grand que celui du corps de pompe F, renferme aussi un piston plongeur B, lequel porte un plateau C (*fig.* 170); au-dessus de ce plateau, se trouve une plate-forme fixe D, invariablement reliée au cylindre par de solides colonnes de fonte E, E. Les objets qu'on veut soumettre à l'action de la presse sont placés entre les deux plateaux.

Fig. 171.

— Quand on fait jouer la pompe, l'eau qui s'introduit dans le cylindre A, chaque fois que le piston descend, pousse de bas en haut le piston B, et par suite le plateau C; la distance des deux plateaux diminuant ainsi graduellement, les matières qu'on a placées entre eux sont soumises à une compression croissante.

La presse hydraulique est destinée à exercer des pressions extrêmement considérables et longtemps prolongées; il importe donc d'éviter qu'il s'établisse aucune fuite à l'entour du piston B. Cette condition, partiellement remplie déjà par l'emploi d'un piston plongeur au lieu d'un piston ordinaire, ne l'a été d'une manière complète que par l'introduction d'un dispositif spécial, dû à l'ingénieur anglais Bramah. Une garniture de cuir Q de forme particulière (*cuir embouti*) est établie autour du piston B (*fig.* 171), dans une gorge circulaire creusée dans la paroi du cylindre; cette garniture, dont la figure 172 représente une moitié seulement, est formée d'une couronne, primitivement plate, dont les bords ont été repoussés au maillet. — L'eau qui pénètre dans cette espèce de rigole renversée, et qui lui transmet la pression qu'elle supporte, applique son bord interne contre la surface du piston et son bord externe contre la paroi du cylindre : la fermeture est donc d'autant plus parfaite que la pression développée dans l'appareil est plus considérable.

Fig. 172.

La presse hydraulique a de nombreuses applications dans les arts et

dans l'industrie; elle est employée pour l'extraction des huiles et du suc de la betterave; dans la fabrication des bougies, du papier, du vermicelle, etc., etc.

IV. — SIPHON

194. Siphon. — Le siphon est un tube recourbé *aca'* (*fig.* 173), formé de deux branches d'inégale longueur; on l'emploie pour le transvasement des liquides.

Pour en établir la théorie, supposons que les deux branches, entièrement pleines d'eau, plongent dans des réservoirs dont les niveaux *mn* et *m'n'* soient situés à des hauteurs différentes, et cherchons, dans ces conditions, à estimer les pressions qui s'exercent aux deux extrémités de la colonne liquide *aca'*. — Soit *c* le point le plus élevé du liquide; la couche *ab*, située au niveau *mn*, reçoit de haut en bas une pression égale à celle d'une colonne d'eau ayant pour base *ab* et pour hauteur la distance verticale *h* du point *c* au plan *mn*; de bas en haut, *ab* reçoit la pression de l'atmosphère. Désignons par H cette dernière pression, évaluée en colonne d'eau (environ 10m,4); la couche *ab*, et par suite toute la colonne liquide contenue dans le siphon est sollicitée, dans le sens *aca'*, par une pression égale à la différence H — *h*. Soit de même *h'* la hauteur du point *c* au-dessus du niveau *m'n'*; la pression résultante qui s'exerce de bas en haut sur la couche *a'b'*, et qui sollicite la colonne liquide dans le sens *a'ca*, est H — *h'*. — Si donc, comme le suppose ici la figure, *h'* est plus grand que *h*, l'eau est poussée dans le siphon, du niveau le plus élevé *mn* vers le niveau le plus bas, et la pression qui détermine ce mouvement, évaluée en colonne d'eau, est égale à la différence entre H — *h* et H — *h'*, c'est-à-dire à *h'* — *h*.

Fig. 173.

L'eau s'écoulerait dans le même sens encore, lors même que l'extrémité de la plus grande branche du siphon s'ouvrirait librement dans l'atmosphère, ainsi que le représente la figure 174. Il suffit, pour cela, que le liquide ait été amené dans la branche DC au-dessous du plan de son niveau dans le vase V, ou, comme on dit, que le siphon ait été *amorcé*.

Si le liquide qu'on se propose de transvaser est de l'eau, on amorce en général le siphon en aspirant avec la bouche, par l'extrémité ouverte C,

une partie de l'air qu'il contient; l'eau monte alors dans la branche AB, et passe de là dans la branche DC. — Mais ce procédé serait dangereux s'il s'agissait de liquides tels que des acides concentrés; on emploie, en pareil cas, des siphons tels que ABC (*fig.* 175). Près de l'extrémité C de la grande branche, est soudé un tube latéral *ado*; on aspire par l'orifice *o* de ce tube, en tenant l'ouverture C fermée avec le doigt; quand le liquide atteint le point *a*, on retire le doigt et la bouche. Le siphon est alors amorcé, et l'écoulement continue aussi longtemps que le niveau dans le vase V est plus élevé que le point d'insertion *a* du tube latéral, où s'exerce la pression atmosphérique (*).

Fig. 174.

Fig. 175. — Siphon pour le transvasement des acides.

(*) D'après la théorie précédente, la pression $h'-h$ qui détermine le mouvement du liquide dans un siphon est indépendante de la pression atmosphérique; ce résultat tient à ce que nous avons regardé les pressions exercées par l'atmosphère sur les

195. *Vase de Tantale.* — Le vase de Tantale est un verre à pied contenant un siphon (*fig.* 176); la grande branche traverse le fond et s'ouvre librement à l'extérieur. Si l'on verse de l'eau dans le verre, elle pénètre peu à peu dans la branche de droite, où son niveau est d'abord sur le même plan horizontal que dans le vase; puis, au moment où le niveau extérieur atteint le sommet C de la courbure, l'eau passe dans l'autre branche, où elle se répand à cause de la pression exercée de bas en haut à l'orifice intérieur du siphon; celui-ci une fois amorcé, l'écoulement continue, jusqu'à ce que le niveau MN de l'eau se soit abaissé au-dessous de l'extrémité de la petite branche du siphon.

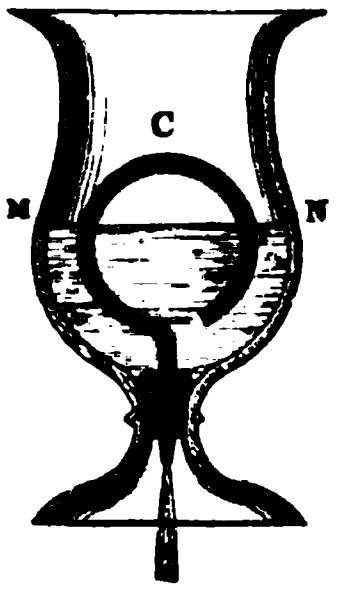


Fig. 176. — Vase de Tantale.

196. Pipette. — On emploie souvent, pour transvaser de petites quantités de liquides, un tube tel que OC (*fig.* 177), renflé en son milieu A et terminé à la partie inférieure par un orifice très-étroit : cet instrument prend le nom de *pipette*. — Supposons qu'en le plongeant dans un vase contenant de l'eau, on l'ait empli entièrement de ce liquide; si l'on applique le doigt sur l'extrémité supérieure O, de manière à la fermer exactement, et qu'ensuite on retire la pipette, le liquide y demeure soutenu par la pression atmosphérique (124). Vient-on à enlever le doigt, cette pression s'exerce aux deux extrémités de la colonne; le liquide s'écoule donc, en vertu de son poids, sous la forme d'un mince filet, tandis qu'il pénètre de l'air dans la pipette par la partie supérieure. Enfin, si, pendant l'écoulement, on ferme de nouveau l'orifice supérieur avec le doigt, il sort encore un peu de liquide; mais, le volume de l'air intérieur augmentant, sa force élastique diminue: il arrive donc un moment où cette force élastique qui s'exerce en A, ajoutée à la pression de la colonne liquide AC, fait équilibre à la pression atmosphérique; l'écoulement s'arrête alors, et ne reprend que si l'on enlève le doigt appliqué en O. — Le plus ordinairement, on emplit la pipette en aspirant, avec la bouche, à la partie supérieure, et on place le doigt dès que le liquide est arrivé à une hauteur convenable.

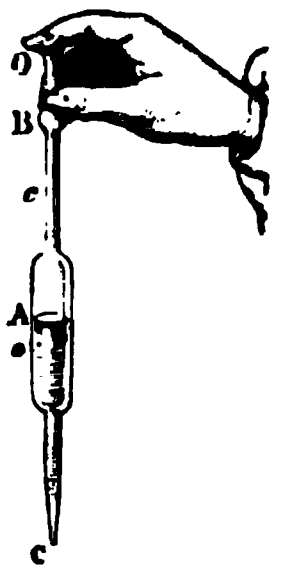


Fig. 177. Pipette.

niveaux *mn* et *m'n'* (*fig.* 175) comme égales entre elles. C'est là du reste une approximation parfaitement légitime daus la plupart des cas, puisque la distance verticale des deux niveaux est presque toujours très-peu considérable. — Mais si l'on exerçait artificiellement sur *mn* et sur *m'n'* des pressions différentes, il faudrait, dans le calcul, tenir compte de ces pressions. Représentons par H et H' leurs valeurs en colonne d'eau; si $H - h$ est supérieur à $H' - h'$, l'écoulement aura lieu encore dans le sens *aca'*; mais il s'effectuera dans le sens opposé, si c'est $H' - h'$ qui est plus grand que $H - h$.

LIVRE DEUXIÈME

CHALEUR

CHAPITRE PREMIER

DILATATION DES CORPS PAR LA CHALEUR THERMOMÈTRE

197. **Accroissement de longueur des barres solides, sous l'action de la chaleur.** — Tous les corps, sauf quelques exceptions très-rares, se dilatent quand on les échauffe, et se contractent quand ils se refroidissent. — Nous allons constater d'abord que les corps solides ayant la forme de barres s'allongent quand on les échauffe.

Une tige métallique AB (*fig.* 178), de 30 à 40 centimètres de longueur,

Fig. 178. — Pyromètre à levier.

traverse deux colonnes C et C′; elle est fixée en A au moyen d'une vis de pression, passe librement dans la colonne C′, et vient appuyer en B contre la plus petite branche d'un levier coudé BDE, mobile autour du point D.

L'extrémité de la grande branche DE de ce levier peut parcourir un arc de cercle gradué FF′, dont le centre est en D. — L'instrument est ordinairement désigné sous le nom de *pyromètre à levier*.

On échauffe la tige en enflammant de l'alcool contenu dans le réservoir GG′; elle s'allonge, et comme son extrémité A est fixe, l'autre extrémité se déplace seule et pousse devant elle la branche DB du levier, en la faisant tourner autour du point D. La branche DE étant plus longue que DB, le déplacement du point E est lui-même plus grand que celui du point B : si DE est, par exemple, égal à dix fois DB, l'arc décrit par l'extrémité E a une longueur égale à dix fois celle de l'arc décrit par l'extrémité B de la petite branche, lequel se confond sensiblement avec le déplacement de l'extrémité de la tige elle-même. On voit donc que l'emploi du levier coudé permet d'amplifier la dilatation de la tige, dans le rapport de la longueur de la grande branche à celle de la petite.

Si, après avoir échauffé la tige, on la laisse refroidir en éteignant l'alcool, on voit l'aiguille DE revenir graduellement à sa position primitive. La tige reprend donc sa longueur première, en se contractant par le refroidissement.

198. **Accroissement de volume des corps solides, sous l'action de la chaleur.** — L'*anneau de S' Gravesande* permet de constater l'augmentation de volume des corps solides qu'on échauffe. — A froid, la sphère de cuivre S (*fig.* 179) passe exactement à travers l'anneau de cuivre C : vient-on à chauffer la sphère à l'aide d'une lampe à alcool, sans échauffer l'anneau, la sphère ne traverse plus l'anneau, dans quelque sens qu'on la présente ; elle a donc éprouvé un accroissement de volume. Quand on la laisse refroidir, ses dimensions redeviennent ce qu'elles étaient avant l'expérience. — Si l'on chauffe en même temps la sphère et l'anneau, on constate que les dimensions intérieures de l'anneau restent égales aux dimensions extérieures de la sphère.

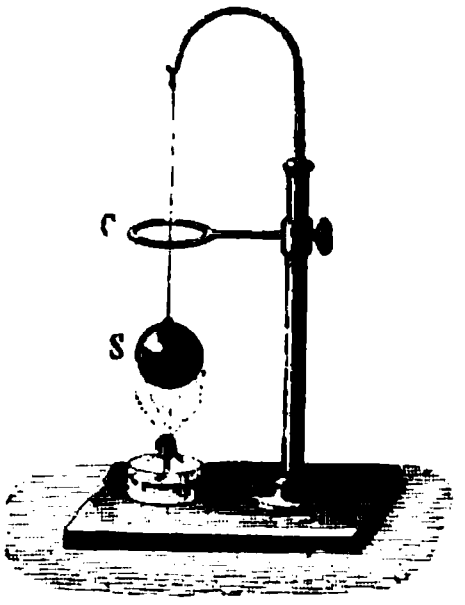


Fig. 179. — Anneau de S'Gravesande.

De ces observations, il est déjà possible de conclure :

1° *Que le volume des corps solides qu'on échauffe s'accroît dans tous les sens;*

2° *Que la capacité des espaces vides que ces corps peuvent présenter s'accroît d'une quantité égale à l'accroissement de volume d'un corps solide de même nature, qui remplirait exactement cette capacité.*

Cette dernière remarque fait pressentir, par exemple, que la capacité intérieure d'un vase de verre augmente, sous l'action de la chaleur, comme le volume d'une masse du même verre qui remplirait exactement le vase. Ce principe, sur lequel nous reviendrons, et qui peut être dé-

montré par des expériences plus rigoureuses, est susceptible de nombreuses applications.

199. **Accroissement de volume des corps liquides sous l'action de la chaleur.** — La dilatabilité des corps liquides peut facilement se constater sur une masse d'eau colorée, placée dans un ballon de verre B (*fig.* 180), terminé par un tube étroit. On marque sur un index de papier l'extrémité de la colonne liquide; on plonge ensuite le ballon dans un vase contenant de l'eau chaude: la dilatation du liquide fait monter rapidement la surface du liquide vers la partie supérieure du tube.

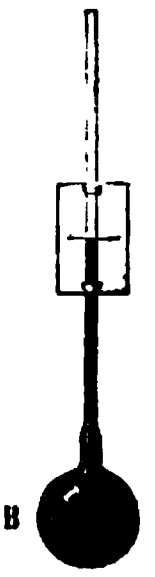


Fig. 180.

Lorsqu'on suit attentivement cette expérience, on observe que, à l'instant où l'enveloppe de verre est mise en contact avec l'eau chaude, le niveau du liquide, au lieu de s'élever immédiatement, commence par s'abaisser au-dessous de sa position primitive; bientôt cependant il s'arrête, remonte à son point de départ et le dépasse, ainsi que nous venons de le dire. — Ces diverses particularités s'expliquent sans peine, si l'on remarque que l'enveloppe de verre a dû s'échauffer la première: sa capacité a donc augmenté (198), et le niveau du liquide a dû s'abaisser d'abord. Mais le liquide s'est dilaté à son tour: on a vu alors le niveau remonter vers sa position primitive et la dépasser; cette simple observation suffit pour montrer que le liquide employé est plus dilatable que le verre.

200. **Accroissement du volume ou de la force élastique des gaz, sous l'action de la chaleur.** — Pour les corps gazeux, la démonstration est plus facile encore. Le ballon de verre B (*fig.* 181) contient de l'air; une petite colonne de liquide coloré *a*, introduite dans le tube horizontal, sépare ce gaz de l'air extérieur. — Il suffit d'échauffer légèrement le ballon, en approchant la main, pour voir le liquide se mouvoir vers l'extrémité libre du tube. Il revient vers le ballon, quand on éloigne la main.

Dans cette expérience, la force élastique du gaz est toujours restée la même et égale à la pression atmosphérique, tandis que le volume s'est accru. On conçoit que, si des obstacles s'opposent plus ou moins complétement à cet accroissement de volume du gaz, l'échauffement doit avoir pour effet une augmentation de force élastique. — C'est ce que l'on peut constater par l'expérience suivante. Le ballon de verre B (*fig.* 182) contient de l'air : le tube recourbé et la boule dont il est muni contiennent un liquide coloré : quand on approche la main du ballon, on voit le liquide monter rapidement dans

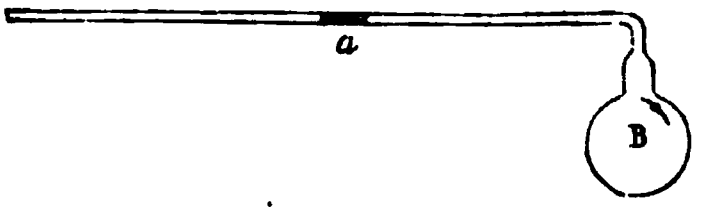


Fig. 181.

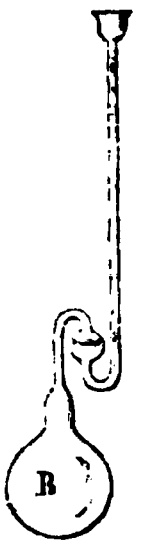


Fig. 182.

la branche ouverte du tube, tandis que le niveau varie très-peu dans la boule, si celle-ci a des dimensions suffisantes.

201. **Température.** — L'expérience de chaque jour montre que, si deux corps inégalement chauds sont mis en contact, le plus chaud se refroidit, tandis que l'autre s'échauffe. En même temps, le premier se contracte, le second se dilate. — Au bout d'un temps suffisamment long, les deux corps arrivent l'un et l'autre à un volume qui reste sensiblement constant, si aucune cause extérieure ne vient agir sur eux. On dit alors que ces deux corps sont *à la même température*.

Le sens du toucher permet, dans certains cas, de décider avec certitude si un corps est à une température plus élevée ou plus basse qu'un autre. Mais les impressions de chaud et de froid que nous percevons au contact dépendent, en général, de la disposition particulière dans laquelle se trouvent nos organes. Il serait d'ailleurs souvent impossible, à l'aide de ces seules impressions, de reconnaître si, à un instant déterminé, un corps est plus chaud ou plus froid qu'à une époque antérieure : enfin, il est un très-grand nombre de circonstances où l'on ne peut songer à employer le sens du toucher comme moyen d'investigation. Les variations de volume, quand on pourra les observer, fournissent un moyen de comparaison dont la généralité est évidente.

202. **Thermomètre.** — Pour faciliter la comparaison des températures et permettre d'établir entre elles des relations numériques, on a recours au *thermomètre*.

Soit deux corps M, M′, dont on se propose de comparer les températures ; prenons comme auxiliaire un corps m, et supposons-le assez petit pour que, par son contact avec l'un ou l'autre des deux corps M ou M′, il ne puisse jamais leur faire éprouver de refroidissement ou de réchauffement appréciable. On mettra d'abord m en contact avec M : la variation de température de M sera insensible, en sorte que la température finale commune à M et à m pourra être considérée comme égale à la température initiale de M ; soit v le volume acquis par le corps m, dans cette circonstance. On mettra ensuite le même corps m en contact avec M′ ; la température finale commune à M′ et à m pourra être considérée comme égale à la température initiale de M′ ; soit v' le volume acquis par le corps m. Si l'on a $v = v'$, on en devra conclure que M et M′ étaient à la même température ; si l'on a $v > v'$, c'est que la température de M était plus élevée que celle de M′. — Ce corps m, dont les variations de volume permettent de comparer les températures des divers corps avec lesquels on le met en contact, est un thermomètre.

On voit immédiatement que, pour servir aux usages auxquels on le destine, et pour donner des indications exactes, un thermomètre doit remplir les deux conditions suivantes :

1° avoir une masse suffisamment petite, par rapport à celle des corps dont il doit servir à étudier les températures ;

2° indiquer, par des variations de volume facilement appréciables, de faibles variations de température.

205. **Thermomètre à mercure. — Sa construction.** — Le thermomètre à mercure se compose d'un réservoir cylindrique (*fig.* 183) soufflé ou soudé à la partie inférieure d'une tige capillaire, sur laquelle est marquée une graduation destinée à déterminer la position exacte du sommet de la colonne liquide.

Construction. — Lorsqu'on veut construire un thermomètre à mercure, il faut, avant tout, faire choix d'un tube capillaire dont l'intérieur soit bien cylindrique, de manière que des traits équidistants tracés sur le tube correspondent à des capacités égales; on reconnaît qu'un tube satisfait à cette condition, lorsqu'une petite colonne de mercure, introduite dans l'intérieur, y présente une longueur constante, dans toutes les positions qu'on peut lui donner : on dit alors qu'il est *bien calibré*. — A l'une de ses extrémités, on soude une boule de verre B (*fig.* 184), surmontée d'un tube effilé; on fond l'autre extrémité pour la fermer, on la chauffe fortement, et l'on y souffle, aux dépens de l'épaisseur du tube, un réservoir qui prend la forme d'une *olive* allongée. Le thermomètre est ainsi préparé pour l'emplissage, et, si l'on ne veut pas procéder immédiatement à cette dernière opération, on ferme à la lampe l'extrémité effilée, pour empêcher l'humidité et la poussière d'y pénétrer.

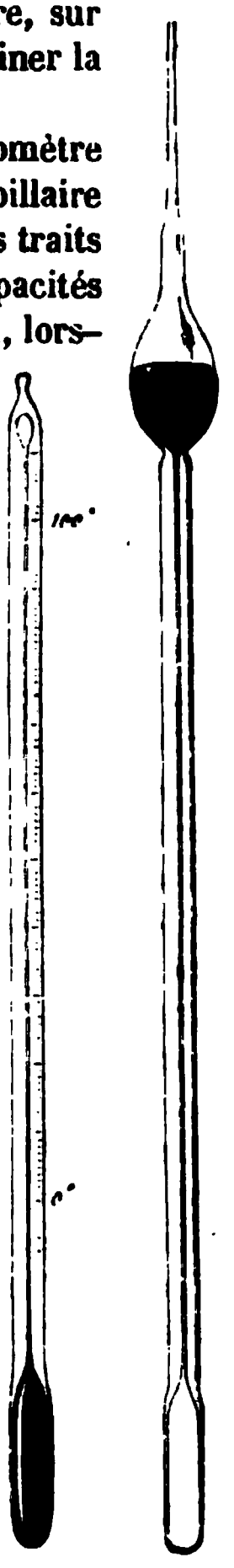


Fig. 183. Fig. 184.

Lorqu'on veut introduire le mercure, on brise l'extrémité de la pointe, et, après avoir chauffé légèrement le réservoir et la boule pour dilater l'air, on plonge la pointe dans le mercure : l'air intérieur, en se refroidissant, se contracte et laisse entrer dans la boule une certaine quantité de liquide; quand on juge cette quantité suffisante pour emplir au moins le réservoir et une partie de la tige, on redresse l'instrument (*fig.* 184). — A ce moment, le mercure, malgré sa grande densité, ne peut arriver jusque dans le réservoir; il pénètre un peu dans la tige, mais il ne peut se diviser dans le tube capillaire pour laisser sortir l'air intérieur. On chauffe alors le réservoir, en tenant l'appareil incliné, de manière que le gaz, en se dilatant, fasse remonter tout le liquide dans la boule et s'échappe dans l'atmosphère. On laisse ensuite refroidir le réservoir : la force élastique de l'air qu'il contient encore diminue; une certaine quantité de mercure peut donc pénétrer dans le réservoir, pour y remplacer l'air expulsé. On achève d'emplir l'instrument en le chauffant

sur la grille inclinée qui nous a servi dans la construction du baromètre (*fig.* 103) ; on fait bouillir le mercure, dont la vapeur entraîne avec elle, non-seulement les dernières traces d'air, mais encore l'humidité. Enfin, on laisse refroidir, en retirant successivement les charbons : la vapeur mercurielle se condense, et le liquide de la boule, qu'on a eu soin de chauffer en même temps, vient remplir entièrement le réservoir et la tige.

Il reste à régler la course du thermomètre et à le fermer. Pour cela, après avoir détaché la boule B, on porte l'instrument à une température un peu supérieure à la plus haute température qu'il doive indiquer : l'excédant de mercure s'échappe, et, tandis que la tige est encore pleine, on en fond à la lampe l'extrémité supérieure, qui se ferme ainsi d'elle-même, et le thermomètre se trouve entièrement vide de gaz. — Quelquefois cependant on préfère y conserver un peu d'air ; on ne ferme alors qu'après avoir laissé le mercure se retirer du sommet de la tige. On a soin, dans ce cas, de ménager à la partie supérieure un petit réservoir à air M (*fig.* 183), qui sert à prévenir la rupture du thermomètre lorsque, dans les usages auxquels on l'emploie, on dépasse par mégarde la température qui amène le liquide au sommet de la tige.

204. **Détermination des points fixes. — Graduation du thermomètre centigrade.** — Les indications thermométriques doivent avoir une signification bien déterminée, de manière que les évaluations fournies par divers instruments, soient comparables entre elles. On doit donc marquer d'abord, sur les divers instruments, le niveau du liquide correspondant à un certain nombre de températures, adoptées comme *points fixes*. — L'intervalle de ces points fixes sera occupé par une graduation déterminée, qui servira à évaluer les températures intermédiaires.

La graduation qui est maintenant adoptée en France, et qui est connue sous le nom de *graduation centigrade*, repose sur les deux observations suivantes :

1° La température de la glace fondante est toujours la même, quel que soit l'état de l'air environnant ; elle demeure invariable pendant toute la durée de la fusion. — Pour s'en assurer, il suffit de plonger un thermomètre, gradué ou non, dans une masse un peu considérable de neige ou de glace fondante. Le sommet de la colonne liquide arrive en un point de la tige, qui est toujours le même; il y demeure fixe, tant que la glace n'est pas complétement fondue.

2° La température de la vapeur qui s'échappe de l'eau bouillante est toujours la même, pourvu que l'expérience soit faite sous la même pression atmosphérique; elle est invariable pendant toute la durée de l'ébullition. — La vérification expérimentale est semblable à la précédente.

Le point où le mercure s'arrête, quand l'instrument est environné de glace fondante, est le *point fixe inférieur* ou le *zéro* du thermomètre; le

point où parvient le liquide quand le thermomètre est placé dans la vapeur d'eau bouillante, la pression environnante étant de 760 millimètres, est le *point fixe supérieur* ou le *centième degré*.

Pour déterminer le zéro d'un thermomètre, on emplit de neige ou de glace pilée fondante un vase cylindrique (*fig.* 185), dont le fond est percé de trous; on y enfonce l'instrument, de manière que toute la colonne de mercure soit environnée de glace. De temps en temps, on soulève un peu la tige pour observer le sommet de la colonne : quand il est devenu stationnaire, on marque sa position sur la tige, avec un pinceau, ou bien on fait sur le verre un petit trait au diamant.

La détermination du point fixe supérieur exige plus de précau-

Fig. 185. Fig. 186.

tions. On se sert ordinairement de l'appareil qui est représenté d'ensemble par la figure 186, et en coupe par la figure 187. La vapeur se produit dans la chaudière inférieure, s'élève de là dans la cheminée centrale M (*fig.* 187), et redescend dans l'espace NN qui l'enveloppe de toutes parts : elle s'échappe finalement par l'ouverture C. Le thermomètre T est fixé en A au moyen d'un bouchon ; son réservoir se trouve à peu de distance de la surface de l'eau bouillante. On voit que, par cette disposition, la vapeur qui circule autour de la tige du thermomètre conserve la température qu'elle avait dans la chaudière, car celle qui l'enveloppe en NN la préserve

du refroidissement extérieur. — L'ouverture C doit être assez large pour que la pression dans l'appareil soit toujours égale à la pression extérieure : on s'assure de cette égalité au moyen d'un petit manomètre à eau, adapté dans une tubulure B qui débouche dans la cheminée centrale; les niveaux *m* et *n* du liquide dans le manomètre doivent toujours être à la même hauteur. — De temps à autre, on soulève un peu le thermomètre en le faisant glisser dans son bouchon; lorsque l'on a reconnu que le sommet de la colonne ne change plus de place, on marque sur la tige le point qui lui correspond : ce sera le point 100 de la graduation, pourvu que la pression atmosphérique du moment soit de 760 millimètres.

Ayant déterminé les deux points fixes de la graduation, on partage en 100 parties égales la distance qui les sépare; chacune de ces divisions est un *degré* de l'instrument. On prolonge la division, s'il y a lieu, au-dessus du centième degré; on marque de même, au-dessous du zéro, des divisions égales aux précédentes, et on les désigne par les chiffres 1, 2, 3, etc., qui forment ainsi une échelle descendante pour indiquer les températures inférieures à celle de la fusion de la glace. — Dans les notations, on fait en général précéder les chiffres qui indiquent ces dernières températures du signe —, pour les distinguer de celles qui se rapportent à des températures supérieures à 0° : ainsi, — 25° désigne une température de 25 degrés au-dessous de zéro; tandis que + 25°, ou simplement 25°, désigne une température de 25 degrés au-dessus de zéro.

Fig. 167.

205. Correction due à la valeur de la pression atmosphérique, au moment de la détermination du centième degré. — S'il arrive que, au moment de la détermination du 100e degré, la pression soit un peu supérieure ou un peu inférieure à 760mm, on peut calculer la correction à faire subir à l'échelle, d'après l'observation suivante de Wollaston : la température de la vapeur d'eau s'élève ou s'abaisse de 1 degré, quand la pression augmente ou diminue de 27mm, au voisinage de 760mm. On admet alors que les petites différences de pression sont proportionnelles aux différences de températures. — Si, par exemple, on a constaté que la pression au moment de l'expérience est de 769mm, l'excès sur la pression normale étant 9mm, la température de la vapeur

était $100^{\circ} + \frac{1}{27} \times 9$, ou $100^{\circ} + \frac{1}{3}$; on peut donc déterminer la position du centième degré au-dessous du point où arrivait le niveau du mercure dans la tige. — Si, au contraire, la pression était de 751^{mm}, la température serait $100^{\circ} - \frac{1}{3}$, et le centième degré serait au-dessus.

206. **Déplacement du zéro.** — Lorsqu'on prend un thermomètre construit depuis un certain temps, et qu'on le plonge dans la glace fondante, on constate presque toujours que le point où s'arrête le sommet de la colonne liquide est plus élevé, d'une ou deux divisions, que le point qui avait été primitivement marqué zéro.

Cette particularité, signalée par Flaugergues, avait été attribuée d'abord à un effet successif de la pression atmosphérique, sur l'enveloppe vide d'air à l'intérieur. Mais Despretz, en opérant avec des thermomètres ouverts, sur lesquels la pression atmosphérique s'exerçait aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur, a vu le zéro se déplacer comme dans les thermomètres fermés. Le phénomène est donc indépendant de la pression atmosphérique : il doit être attribué aux changements moléculaires que le verre éprouve lorsque, après avoir été travaillé à la lampe à une température élevée, il est ensuite abandonné à la température de l'atmosphère.

On devra toujours, avant de se servir d'un thermomètre pour une série d'observations, déterminer par expérience le déplacement qu'a pu éprouver le zéro, et diminuer d'autant toutes les températures observées.

207. **Échelle de Réaumur.** — L'*échelle de Réaumur*, dont on a fait usage pendant assez longtemps en France, et qui est encore employée dans quelques parties de l'Allemagne, diffère de l'échelle centigrade en ce que le point correspondant à l'ébullition de l'eau est marqué 80° : l'intervalle entre ce point et le zéro est divisé en 80 parties égales. La figure 188 montre le parallélisme des deux échelles (*).

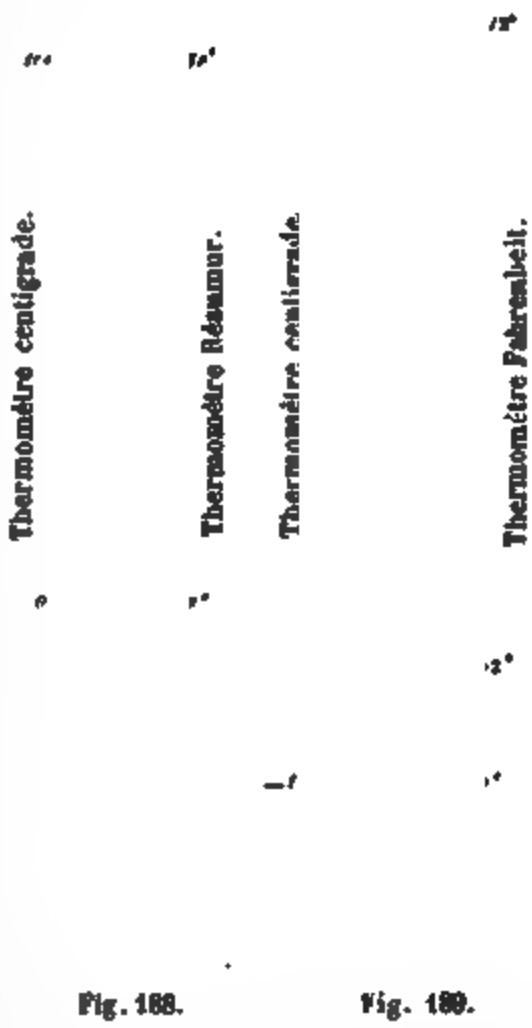


Fig. 188. Fig. 189.

(*) Il est facile de convertir une indication du thermomètre Réaumur en indication

208. **Échelle de Fahrenheit.** — L'*échelle de Fahrenheit*, construite d'après des idées théoriques aujourd'hui abandonnées, est fréquemment employée encore en Angleterre; elle marque 32 degrés à la glace fondante, et 212 degrés à la vapeur d'eau bouillante. L'intervalle est divisé en 212 — 32 ou 180 degrés égaux. La figure 189 montre la correspondance entre cette échelle et l'échelle centigrade (*).

209. **Thermomètre à alcool.** — Le mercure se congelant à la température de — 40° C., le thermomètre à mercure ne peut servir à étudier les températures très-basses, celles qu'on observe par exemple dans les contrées polaires. On remplace alors le mercure par de l'alcool absolu, que l'on colore quelquefois en rouge par la teinture d'orseille.

Construction. — L'introduction de l'alcool dans l'enveloppe thermométrique peut s'effectuer un peu plus simplement que celle du mercure, et sans qu'il soit nécessaire de souder une boule à la partie supérieure de la tige. On chauffe d'abord légèrement le réservoir, pour en dilater l'air,

du thermomètre centigrade. — En effet 80° R. valent 100° C.; il en résulte que 1° R. vaut $\frac{100}{80}$ ou $\frac{10}{8}$ de degré centigrade. Il suffit donc de multiplier par 10 le nombre de degrés marqués par le thermomètre Réaumur et de diviser le produit par 8, pour avoir le nombre équivalent de degrés centigrades. — En opérant ainsi, on trouve par exemple que 32° R. équivalent à 40° C.

Réciproquement, pour convertir un certain nombre de degrés centigrades en degrés Réaumur, on multipliera ce nombre par 8 et on divisera le produit par 10. — Exemple : 14° C. = 11°,2 Réaumur.

(*) On peut se proposer de traduire en degrés centigrades une indication du thermomètre Fahrenheit, ou réciproquement. On remarquera d'abord que l'intervalle entre la température de la glace fondante et celle de la vapeur d'eau bouillante comprend 180 degrés de Fahrenheit et 100 degrés centigrades, en sorte que 1 degré de Fahrenheit vaut $\frac{100}{180}$ ou $\frac{10}{18}$ de degré centigrade. — Cela posé, quelle que soit la question à résoudre, il suffira toujours de considérer d'abord l'intervalle compris entre la glace fondante et la température donnée, de l'évaluer en degrés de la nouvelle échelle, et de compter ensuite ces degrés à partir de leur zéro.

Soit, par exemple, une température marquée 95° F. à évaluer en degrés centigrades. L'intervalle compris entre la glace fondante et cette température est de 95 — 32 ou 63 degrés de Fahrenheit; cet intervalle vaut, en degrés centigrades, $63 \times \frac{10}{18}$ ou 35 degrés, et comme les degrés centigrades se comptent à partir de la glace fondante, la température donnée correspond à celle de 35° C. — Soit encore une température marquée 5° F. à évaluer au moyen de l'échelle centigrade. L'intervalle compris entre la glace fondante et cette température est de 32 — 5 ou 27 degrés de Fahrenheit; cet intervalle équivaut à $27 \times \frac{10}{18}$ ou 15 degrés centigrades, et comme cette température est inférieure à la glace fondante, elle correspond à celle de — 15° C. — En raisonnant tout à fait de la même manière, on trouvera encore que le zéro de Fahrenheit correspond approximativement à — 17°,78 C.

Inversement, soit une température marquée 23° C. à évaluer au moyen de l'échelle de Fahrenheit. Les degrés centigrades étant comptés à partir de la glace fondante, on remarquera immédiatement que l'intervalle entre ce point et la température donnée vaut, en degrés de Fahrenheit, $23 \times \frac{18}{10}$ ou 41,4; comme d'ailleurs l'échelle de Fahrenheit marque 32° à la glace fondante, la température proposée correspond à celle de 41,4 + 32 ou de 73°,4 F. — On résoudra de même toutes les questions analogues.

on renverse l'appareil, et on plonge dans l'alcool l'extrémité ouverte de la tige; lorsque le refroidissement a fait monter un peu de liquide dans le thermomètre, on le redresse, et on le chauffe de manière à faire bouillir l'alcool dans le réservoir et à chasser ainsi tout l'air. L'ébullition s'effectuant à une température beaucoup plus basse que pour le mercure (c'est environ 78° C), on peut, sans inconvénient, plonger de nouveau la tige dans l'alcool froid, et laisser le liquide arriver dans le réservoir au moment où la vapeur se condense, sans craindre que le verre se brise. — On ferme ensuite l'instrument à la lampe, en laissant toujours un peu d'air au-dessus du liquide.

Le zéro du thermomètre à alcool se détermine comme celui du thermomètre à mercure; mais en général on ne prolonge pas l'échelle jusqu'à la température d'ébullition de l'eau, car, à cette température, supérieure de 22 degrés à celle de l'ébullition de l'alcool, ce liquide émet des vapeurs douées d'une force élastique considérable, qui pourraient déterminer la rupture de l'enveloppe. On se contente alors de marquer un degré de l'échelle un peu inférieur, en plongeant le thermomètre à l'alcool dans un liquide dont la température est donnée par un thermomètre à mercure gradué directement (*).

210. **De la sensibilité dans les thermomètres.** — On distingue dans les thermomètres deux sortes de sensibilité, correspondantes à des conditions de construction bien distinctes. La première est la propriété de se mettre rapidement en équilibre de température avec les corps environnants: elle est d'autant plus grande que les dimensions absolues du réservoir sont moindres. La seconde est la propriété d'apprécier avec exactitude de petites variations de température: elle exige que le degré occupe sur la tige une longueur suffisante pour pouvoir être subdivisée en un certain nombre de parties égales; un thermomètre satisfait d'autant mieux à cette dernière condition, que son réservoir est plus gros et sa tige plus capillaire. — Suivant les usages auxquels l'instrument est destiné, on cherche à lui donner l'une ou l'autre de ces deux espèces de sensibilité.

* 211. **Remarques générales sur le choix des corps employés dans la construction des thermomètres.** — Le thermomètre à mer-

(*) Le thermomètre à alcool et le thermomètre à mercure s'accordent nécessairement aux deux points qui ont servi à fixer l'échelle; mais il n'en résulte pas qu'ils doivent s'accorder à toutes les températures intermédiaires. On conçoit en effet que, si le thermomètre à mercure marque 20° par exemple, c'est que la température correspond à une dilatation du mercure, comptée à partir de 0°, égale à 20 fois la centième partie de se dilatation totale entre 0° et 100°; lorsque le thermomètre à alcool prend la même température, rien ne prouve que l'alcool doive éprouver une dilatation égale à la même fraction de sa dilatation totale entre 0° et 100°, c'est-à-dire qu'il doive marquer 20° comme le thermomètre à mercure. — L'expérience montre que les deux instruments, placés dans des conditions identiques, donnent, en effet, des indications un peu différentes: mais ces différences sont assez faibles pour qu'on n'en doive tenir compte que dans les recherches d'une grande précision.

cure est, ainsi que nous l'avons dit en commençant, le thermomètre le plus fréquemment employé. Il est facile de se rendre compte des raisons qui l'ont fait adopter, de préférence à d'autres.

Et d'abord, pourquoi prend-on comme corps thermométrique un liquide, plutôt qu'un solide, ou plutôt qu'un gaz?

Les corps solides, moins dilatables que les liquides, donneraient évidemment des thermomètres moins sensibles que ces derniers; cet inconvénient pourrait toutefois être atténué par l'emploi d'une disposition analogue à celle du pyromètre à levier (*fig.* 178), qui amplifierait la dilatation réelle du corps. Mais alors l'instrument se trouverait compliqué dans sa construction, et, dans un grand nombre de circonstances, ne pourrait être employé que difficilement. — Les corps solides doivent encore être rejetés pour une autre raison, plus importante peut-être que la précédente. On a remarqué que ces corps, lorsqu'ils sont soumis à des alternatives fréquentes de dilatation et de contraction, éprouvent dans leur structure des changements qui peuvent modifier profondément les lois de leur dilatabilité; un thermomètre formé d'une barre métallique, par exemple, ne serait donc pas, à des époques différentes, un instrument identique à lui-même : il pourrait, à diverses époques, donner des indications qui ne seraient nullement comparables entre elles.

Les corps gazeux, beaucoup plus dilatables que les solides et les liquides, se présentent comme éminemment aptes à mesurer de très-petites différences de température. Ainsi, un appareil semblable à celui que nous avons employé pour démontrer la dilatation des gaz (*fig.* 181) serait un *thermomètre à air* d'une extrême sensibilité. — Nous étudierons plus loin, comme application des dilatations des gaz, différents thermomètres à air; on verra que ces instruments doivent être regardés comme les thermomètres par excellence, dans les expériences de précision. En outre, les indications de divers thermomètres à air doivent être toujours rigoureusement comparables entre elles; en effet, la dilatation des gaz est égale à 140 fois environ celle du verre; dès lors, les légères différences que peut présenter, d'une espèce de verre à l'autre, la dilatation des enveloppes, disparaissent à côté de l'énorme dilatation du gaz. Mais la construction de ces thermomètres est compliquée, la manipulation en est longue et réclame un opérateur habile; en sorte que, pour la pratique ordinaire, il est préférable d'employer des instruments plus simples et moins difficiles à observer. Les thermomètres à liquides remplissent parfaitement cette condition.

Enfin, parmi les liquides, on a choisi le mercure pour de nombreuses raisons. Les principales sont : 1° que ce corps peut être obtenu dans un état de parfaite pureté (*note* de la page 95), condition indispensable pour que tous les thermomètres à mercure soient rigoureusement comparables entre eux; 2° que le point de congélation du mercure (— 40° C.) est très-éloigné de son point d'ébullition (+ 360° C.), et que la plupart des

températures usuelles sont comprises dans l'intervalle de ces deux points ; 3° que le mercure est très-bon conducteur de la chaleur, de sorte qu'un thermomètre construit avec ce liquide se met rapidement en équilibre de température avec les corps environnants (*).

212. **Pyromètres**. — Les thermomètres à réservoir de verre ne peuvent servir à déterminer des températures supérieures à celles auxquelles le verre commence à se ramollir. Les instruments thermométriques capables de résister à de pareilles températures ont reçu le nom de *pyromètres*.

Le *pyromètre de Wedgwood*, imaginé pour évaluer approximativement la température des fours à porcelaine, est fondé sur la propriété que possède l'argile d'éprouver, sous l'action de la chaleur, un retrait permanent d'autant plus prononcé qu'on l'a chauffée plus énergiquement. On introduit dans les fours de petits cylindres d'argile, tous façonnés de la même manière et sur le même moule ; au bout d'un certain temps, on les retire et on les fait glisser dans l'intervalle de deux règles graduées (*fig.* 190), fixées sur une plaque métallique et faisant entre elles un angle déterminé. Le point où chacun d'eux s'arrête fait connaître, avec une approximation assez grossière, la température du four dans lequel il a été placé.

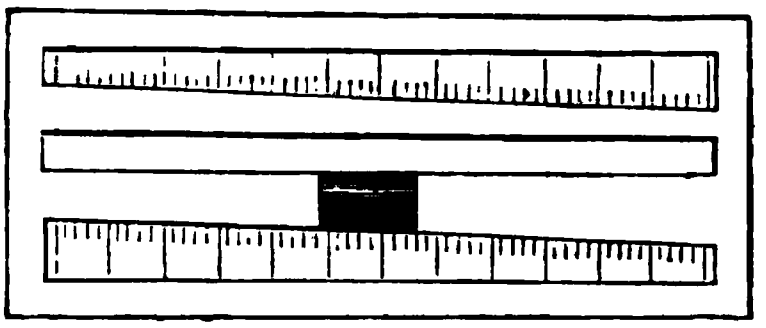


Fig. 190. — Pyromètre de Wedgwood.

Plus tard, *Alexandre Brongniart* employa, à la manufacture de Sèvres, un pyromètre dont la disposition reproduit, dans ce qu'elle a de plus essentiel, celle du pyromètre à levier (*fig.* 178).

Mais le pyromètre le plus exact est le *pyromètre à air*, ou thermomètre à air avec réservoir de platine. Il a été imaginé par Pouillet ; nous en dirons quelques mots plus loin, après avoir étudié la dilatation des corps gazeux.

(*) Nous verrons, dans le chapitre suivant, que l'eau serait un mauvais liquide thermométrique, à cause des particularités que présentent les variations de volume qu'elle éprouve quand on fait varier sa température.

CHAPITRE II

MESURE DES DILATATIONS

I. — DILATATIONS DES CORPS SOLIDES.

213. **Dilatations linéaires.** — Quand on compare entre eux les allongements éprouvés par des règles égales, formées de différentes substances, pour une même élévation de température, on trouve que ces allongements sont inégaux.

On peut admettre, comme un résultat d'expérience, que, entre des limites de température peu étendues, entre 0° et 100° par exemple, chaque élévation de température de 1° produit *sur une même règle* la même dilatation : en d'autres termes, que si, pour une élévation de température de 100°, une règle de zinc de 1 mètre s'est dilatée de $0^m,005$, chaque variation de température de 1° lui a fait éprouver un allongement égal à la centième partie de $0^m,003$, c'est-à-dire à $0^m,00005$.

On appelle coefficient de dilatation linéaire *d'une règle solide le nombre qui exprime l'allongement éprouvé par l'unité de longueur de cette règle, lorsque sa température s'élève de* 1° — Ce nombre doit être considéré comme exprimé au moyen de la même unité que la longueur de la règle même. Dès lors, dire que le coefficient de dilatation linéaire du zinc est 0,00003, c'est dire que, dans une barre de zinc, pour une élévation de température de 1°, une longueur de 1 mètre se dilate de $0^m,00003$, ou bien qu'une longueur de 1 décimètre se dilate de $0^{dec},00003$, ce qui revient évidemment au même.

Si maintenant on a déterminé, par l'expérience, l'allongement qu'éprouve une règle de longueur déterminée, pour une élévation de température connue, on voit immédiatement qu'on obtiendra le *cofficient de dilatation linéaire* en divisant cet allongement par le produit de la longueur de la règle par l'élévation de température.

214. **Formules relatives aux dilatations linéaires.** — Soient l_0 la longueur d'une règle à 0°, δ son coefficient de dilatation linéaire :

proposons-nous de calculer la longueur l de cette règle à t degrés. — Puisque l'unité de longueur de la règle s'allonge de δ en passant de 0° à 1°, elle s'allonge de δt en s'élevant de 0° à t degrés ; par suite, la longueur l_0, en s'élevant de 0° à t degrés, s'allonge de la quantité $l_0\delta t$. La longueur totale de la règle, à cette dernière température, est donc $l_0 + l_0\delta t$ ou $l_0(1+\delta t)$; ainsi :

$$l = l_0(1+\delta t). \tag{1}$$

Dès lors, ayant la longueur d'une règle à 0° degré, pour trouver sa longueur à une température t, il suffit de multiplier la longueur initiale par la valeur du *binôme de dilatation* $1+\delta t$.

Inversement, si l'on connaît la longueur l d'une règle à t degrés, et le coefficient de dilatation linéaire δ, pour avoir la longueur de cette règle à 0°, on aura :

$$l_0 = \frac{l}{1+\delta t} \tag{2}$$

Enfin, de la longueur l à t degrés, il est facile de déduire la longueur l' à t' degrés. — En effet, si l'on prend pour inconnue auxiliaire la longueur l_0 de la barre à la température de 0°, on a

$$l = l_0(1+\delta t), \qquad l' = l_0(1+\delta t'),$$

et, en divisant ces deux équations membre à membre,

$$\frac{l'}{l} = \frac{1+\delta t'}{1+\delta t};$$

ou enfin

$$l' = l\,\frac{1+\delta t'}{1+\delta t}\ (*). \tag{3}$$

215. Mesure des dilatations linéaires : principe de la méthode de Lavoisier et Laplace. — Divers observateurs ont déterminé, par des

(*) Au lieu de cette formule, qui donne la relation *exacte* entre l et l', on en emploie quelquefois une autre, qui est seulement *approchée*. — Effectuons la division indiquée $\frac{1+\delta t'}{1+\delta t}$, nous trouverons pour quotient :

$$1+\delta(t'-t)-\delta^2 t'(t'-t)+\ldots\ldots;$$

or, δ étant toujours une fraction très-petite, on peut négliger les termes en $\delta^2, \delta^3\ldots\ldots$, à côté du terme en δ, et prendre, pour valeur approchée du quotient,

$$1+\delta(t'-t).$$

Il vient alors :

$$l' = l\left[1+\delta(t'-t)\right], \tag{3 bis}$$

relation qui offre avec la formule (1) une analogie frappante, car elle indique que, pour passer de la longueur l, correspondante à une température quelconque t, à la longueur l' correspondante à une autre température t', il suffit de multiplier la première longueur par le binôme de dilatation $1+\delta(t'-t)$, relatif à la *variation* de température $t'-t$.

expériences précises, les coefficients de dilatation linéaire d'un grand nombre de corps solides. Nous décrirons seulement le procédé qu'ont suivi Lavoisier et Laplace, en 1782.

Une règle horizontale, de 2 mètres de longueur, dont on portera la température successivement à 0° et à une autre température connue t, s'appuie par l'une de ses extrémités contre un talon fixe A (*fig.* 191), et par

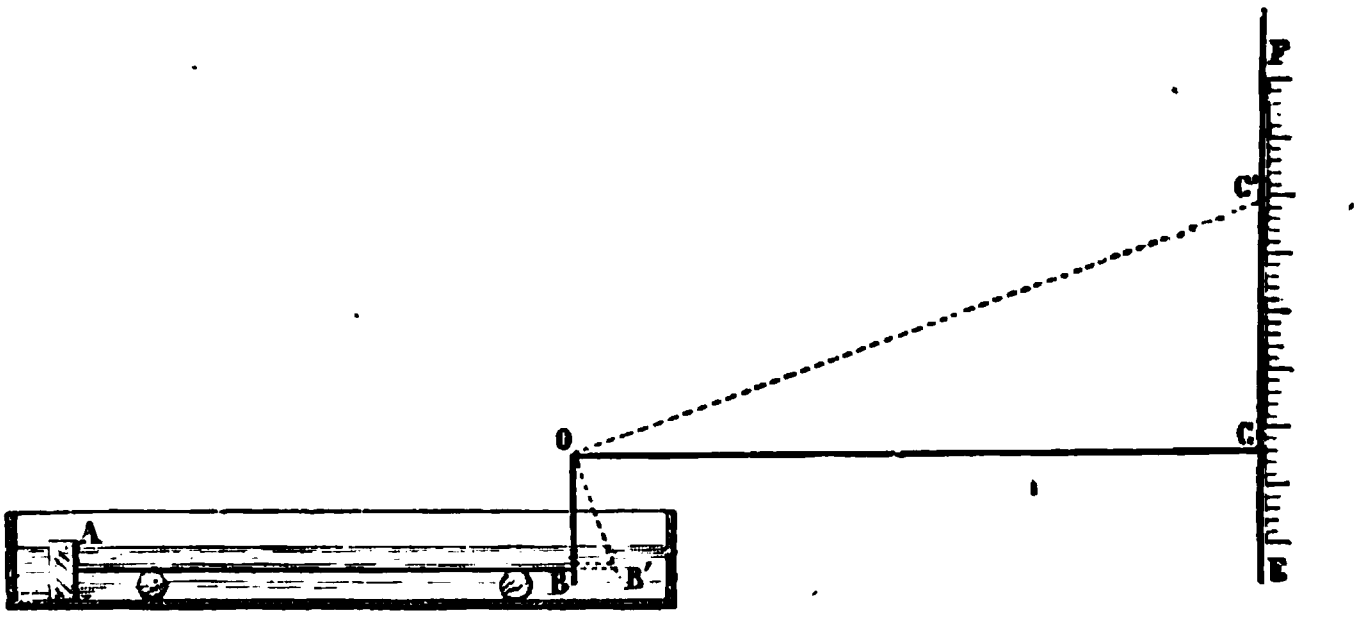


Fig. 191.

l'autre extrémité B contre la plus petite branche d'un levier coudé BOC, mobile dans un plan vertical. Une échelle EF est disposée verticalement, dans le plan du levier, en regard de l'extrémité C de la grande branche. — Soit BB′ l'allongement qu'éprouve la règle AB, en passant de 0° à t degrés ; à cette dernière température, le levier a pris la position B′OC′. Or les triangles semblables BOB′ et COC′ donnent :

$$BB' = CC' \frac{OB}{OC}.$$

Il suffira donc, dans chaque expérience, de mesurer le déplacement CC′ de l'extrémité C sur l'échelle divisée, et de multiplier ce déplacement par le rapport des deux bras de levier OB et OC, lequel aura été déterminé une fois pour toutes. Dans les expériences de Lavoisier et Laplace, ce rapport était égal à $\frac{1}{744}$, en sorte qu'on avait

$$BB' = \frac{1}{744} CC'.$$

On voit que l'erreur commise dans la mesure de CC′ était divisée par 744, et BB′ se trouvait ainsi déterminé avec une grande précision. — Connaissant BB′, c'est-à-dire l'allongement éprouvé entre 0° et la température t, par une barre dont on connaissait la longueur à 0°, il suffisait, pour obtenir le coefficient de dilatation linéaire de la barre, de diviser la quantité BB′ par la longueur initiale et par la variation de température t.

* 216. **Appareil de Lavoisier et Laplace.** — La barre solide, reposant sur des rouleaux de verre et maintenue par deux paires de barres verticales J, J, était placée dans une auge métallique, établie entre quatre piliers de maçonnerie P (*fig.* 192); dans cette auge, on pouvait à vo-

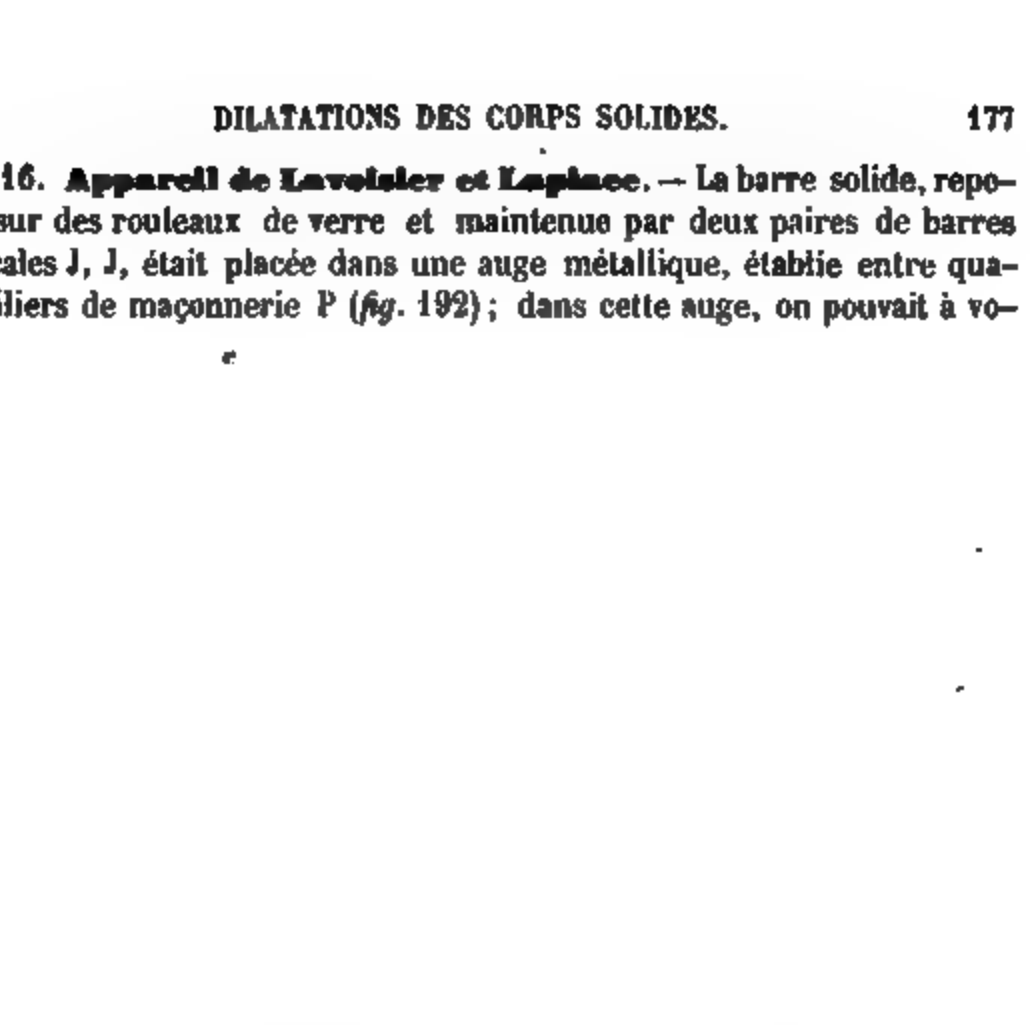


Fig. 192. — Dilatation linéaire des corps solides; appareil de Lavoisier et Laplace.

lonté introduire de la glace fondante pour amener la barre à 0°, ou verser de l'eau bouillante ou de l'huile (*). L'extrémité A s'appuyait contre la règle de verre verticale C, invariablement reliée aux massifs de maçonnerie. L'extrémité B portait contre une règle semblable D, qui constituait la petite branche du levier coudé : cette règle était fixée à une traverse horizontale FE, mobile autour de son axe ; celle-ci entraînait dans son mouvement la tige métallique Ea, qui faisait mouvoir la lunette LL Le mouvement de cette dernière s'exécutait dans un plan vertical contenant une mire divisée, établie à environ 200 mètres de distance des appareils; on apercevait les divisions de la mire en regardant à travers la lunette; le rayon visuel dirigé suivant son axe constituait donc la grande branche du levier coudé.

217. **Résultats relatifs aux dilatations linéaires.** — Nous avons admis, en commençant l'étude des dilatations linéaires (213), qu'une même règle solide s'allonge, entre des limites de température assez restreintes, d'une quantité constante pour chaque élévation de température de 1 degré. Les expériences de Lavoisier et Laplace permettent de justifier cette hypothèse. — Concevons, en effet, qu'on mesure les allongements

(*) Les premières expériences avaient été faites en échauffant progressivement le liquide de l'auge, à l'aide d'un fourneau placé au-dessous. Cette méthode fut ensuite abandonnée pour celle que nous indiquons ici.

d'une même règle solide, successivement entre 0° et 20°, entre 0° et 50°, entre 0° et 100°, et qu'on divise le premier résultat par 20, le deuxième par 50 et le troisième par 100 ; les quotients obtenus expriment les *allongements moyens* de la règle, pour une élévation de température de 1 degré, entre 0° et 20°, entre 0° et 50°, entre 0° et 100°. Les expériences de Lavoisier et Laplace ont montré que ces quotients sont sensiblement égaux entre eux, c'est-à-dire, que chacune des barres soumises à l'expérience s'allonge d'une quantité sensiblement constante, pour chaque élévation de température de un degré, comprise entre les limites 0° et 100°. — Dulong et Petit ont montré plus tard que, au delà de 100°, l'allongement d'une même barre, pour une élévation de température de 1°, est d'autant plus grand que la température est plus élevée.

Lavoisier et Laplace ont également reconnu que certains métaux, tels que le zinc, lorsqu'on les a chauffés de 0° à 100°, ne reprennent plus leur longueur primitive en se refroidissant. — Selon toute apparence, il en est de même pour le verre : cette circonstance expliquerait le phénomène du déplacement du zéro dans les thermomètres (206).

218. Le tableau suivant reproduit la plupart des nombres obtenus par Lavoisier et Laplace :

DILATATIONS LINÉAIRES DES CORPS SOLIDES, D'APRÈS LAVOISIER ET LAPLACE.

NOM DES CORPS.	COEFFICIENTS DE DILATATION LINÉAIRE.
Acier non trempé	0,0000 1079
Acier trempé	variable de 0,0000 1239 à 0,0000 1386
Argent	0,0000 1909
Cuivre	variable de 0,0000 1712 à 0,0000 1722
Étain	de 0.0000 1938 à 0,0000 2173
Fer	de 0,0000 1220 à 0,0000 1235
Flint (cristal)	de 0,0000 0812 à 0,0000 0872
Laiton	de 0,0000 1867 à 0,0000 1890
Or	0,0000 1466
Platine (selon Borda)	0,0000 0857
Plomb	0,0000 2848
Verre sans plomb	variable de 0,0000 0876 à 0,0000 0917
Zinc	de 0,0000 2942 à 0,0000 3108

219. **Dilatation cubique.** — La *dilatation cubique* d'un corps solide est l'accroissement de volume que ce corps éprouve lorsque sa température s'élève.

On appelle coefficient de dilatation cubique *d'un corps solide le nombre qui exprime l'accroissement de volume éprouvé par l'unité de volume de ce corps lorsque sa température s'élève de* 1°. — Ce nombre doit encore être considéré comme exprimé au moyen de la même unité que le volume du corps lui-même (213).

Si l'on a déterminé, par l'expérience, l'accroissement de volume qu'éprouve un corps ayant un volume déterminé, pour une élévation de tem-

pérature connue, on obtiendra le coefficient de dilatation cubique de ce corps, en divisant cet accroissement par le produit du volume primitif par l'élévation de température.

220. **Formules relatives aux dilatations cubiques.** — Si l'on désigne par V_0 le volume d'un corps à 0°, par V son volume à la température de t degrés, et par k son coefficient de dilatation cubique, on a, entre ces trois quantités, la relation :

$$V = V_0(1 + kt), \tag{1}$$

que l'on établirait comme on l'a fait pour la relation analogue, à propos des dilatations linéaires (214). — On en déduit

$$V_0 = V\,\frac{1}{1 + kt}. \tag{2}$$

Enfin, si l'on désigne par V′ le volume du corps à la température t', on a encore :

$$V' = V\,\frac{1 + kt'}{1 + kt}\ (*), \tag{3}$$

formules dont nous aurons souvent à faire usage.

221. **Relation entre le coefficient de dilatation linéaire et le coefficient de dilatation cubique d'un même corps.** — Les corps dont la dilatation est régulière dans tous les sens restent semblables à eux-mêmes quand on les échauffe. De là, la relation suivante :

Le coefficient de dilatation cubique d'un corps est sensiblement égal au triple de son coefficient de dilatation linéaire. — En effet, soit V_0 le volume du corps à 0°, V_1 son volume à la température de 1°, k son coefficient de dilatation cubique ; on a, en faisant $t = 1$ dans les formules précédentes,

$$V_1 = V_0(1 + k).$$

D'autre part, soit a_0 la longueur de l'une quelconque des dimensions du corps à 0°, a_1 sa longueur à 1°, et δ son coefficient de dilatation linéaire ; on a de même

$$a_1 = a_0(1 + \delta).$$

Mais, le corps étant demeuré semblable à lui-même en se dilatant, les volumes V_0 et V_1 sont proportionnels aux cubes des dimensions homologues a_0 et a_1 ; ainsi

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{a_1^3}{a_0^3},$$

(*) On démontrerait comme plus haut (note de la page 173) que cette relation *exacte* entre V′ et V peut être remplacée par la relation *approchée* suivante :

$$V' = V\left[1 + k(t' - t)\right]. \tag{3 bis}$$

en remplaçant V_1 et a_1 par leurs valeurs, il vient

$$\frac{V_0\,(1+k)}{V_0} = \frac{a_0^3\,(1+\delta)^3}{a_0^3},$$

d'où l'on déduit, en supprimant les facteurs communs,

$$1+k=(1+\delta)^3,$$

ou enfin

$$k=3\delta+3\delta^2+\delta^3.$$

Or le tableau de la page 178, qui fait connaître les valeurs de δ pour un certain nombre de corps solides, montre que ces valeurs sont exprimées par des fractions très-petites ; on peut donc négliger les termes $3\,\delta^2$ et δ^3, à côté de 3δ, et admettre simplement

$$k=3\delta;$$

c'est la relation qu'il s'agissait d'établir.

222. **Dilatation des enveloppes.** — Nous avons vu déjà (198) que la capacité intérieure d'une enveloppe solide augmente lorsque la température s'élève, et nous avons fait pressentir que, pour obtenir la valeur de cet accroissement de capacité, il suffirait de calculer *l'accroissement de volume d'une masse solide de même nature, qui la remplirait exactement.*

C'est ce qu'on peut vérifier par des expériences précises. Par exemple, si l'on emplit de mercure un vase ayant à peu près la forme d'un thermomètre à grand réservoir, et si l'on détermine l'accroissement de capacité de l'enveloppe entre 0° et 100°, en se servant de la dilatation connue du mercure comme nous l'indiquerons plus loin, on pourra comparer ce résultat expérimental avec celui qu'on obtiendrait en calculant directement, à l'aide du coefficient de dilatation du verre, l'augmentation de volume d'une masse de verre qui remplirait la même capacité. Or cette comparaison, faite dans un grand nombre de circonstances, ne montre entre les deux résultats que des différences très-petites ; elles doivent être attribuées à des différences de structure, entre le verre qui forme le vase employé et celui de l'échantillon qui avait servi à déterminer le coefficient de dilatation de cette substance.

Toutefois, ces différences sont suffisantes pour qu'il soit nécessaire, dans les recherches qui exigent une grande précision, de déterminer par une expérience directe le coefficient de dilatation particulier à chaque vase de verre. — Le procédé que l'on emploie alors suppose que l'on connaisse la dilatation du mercure : nous y reviendrons plus loin.

II. — DILATATIONS DES LIQUIDES.

225. Dilatation apparente et dilatation absolue. — Les liquides n'ayant par eux-mêmes aucune forme déterminée, il n'y a lieu de s'occuper que de leurs dilatations cubiques. — Les procédés employés pour mesurer la dilatation d'un liquide se ramènent, en général, à placer ce liquide dans un vase de verre et à noter les volumes qu'il y occupe à deux températures différentes. L'accroissement de volume, divisé par le volume initial et par la variation de température, donne le coefficient de dilatation du liquide.

Mais il y a deux manières d'évaluer cet accroissement de volume. — L'une d'elles consiste à ne point tenir compte de la dilatation de l'enveloppe, et à observer simplement la *dilatation apparente* du liquide, dilatation qui est évidemment variable avec la nature du vase. — L'autre méthode, au contraire, tient compte de l'augmentation de volume du vase et conduit à la *dilatation absolue* ou *réelle*.

224. Indication de la méthode générale à suivre, pour mesurer les dilatations absolues des divers liquides. — On démontre que *la dilatation absolue est sensiblement égale à la somme de la dilatation apparente et de la dilatation de l'enveloppe* (*). Dès lors, pour évaluer la dilatation absolue des différents liquides, on voit qu'il suffira

(*) Ce principe peut se démontrer comme il suit. — Supposons le liquide placé dans un vase muni d'un tube gradué, sur lequel on observe les volumes apparents aux diverses températures, et convenons d'évaluer tous les volumes en prenant pour unité la capacité d'une division du tube à 0°. Soit V_0 le volume du liquide à 0°; soit V son volume apparent, c'est-à-dire le nombre de divisions que fournit l'observation directe, à la température t. L'accroissement de volume apparent est alors $V - V_0$; par suite, la *dilatation apparente* pour l'unité de volume est $\frac{V - V_0}{V_0}$; nous allons évaluer cette expression au moyen de la dilatation absolue et de la dilatation de l'enveloppe.

Si l'on désigne par K la dilatation éprouvée par l'unité de volume de la matière de l'enveloppe entre zéro et t, chacune des divisions observées à t degrés vaut $1 + K$, en sorte que le volume réel de la partie de l'enveloppe occupée par le liquide à t degrés est $V(1 + K)$. Enfin, si l'on désigne par Δ la dilatation absolue de l'unité de volume du liquide entre 0° et t, on voit que le volume réel du liquide à t degrés est $V_0(1 + \Delta)$ et, le volume réel du contenant étant égal au volume réel du contenu, on a

$$V(1 + K) = V_0(1 + \Delta)$$

d'où l'on tire la valeur de $\frac{V - V_0}{V_0}$, savoir

$$\frac{V - V_0}{V_0} = \frac{\Delta - K}{1 + K}$$

Or, d'après la valeur du coefficient moyen de dilatation du verre, la quantité K est négligeable vis-à-vis de l'unité, en sorte que le second membre se réduit sensiblement à $\Delta - K$. Donc la dilatation apparente est sensiblement égale à la différence entre la dilatation absolue et la dilatation de l'enveloppe, ce qui revient à dire que *la dilatation absolue est sensiblement égale à la somme de la dilatation apparente et de la dilatation de l'enveloppe.*

d'opérer dans une enveloppe dont on connaisse préalablement la dilatation, et d'ajouter, dans chaque cas particulier, la dilatation apparente du liquide, donnée par l'expérience, à la dilatation connue de l'enveloppe. C'est là, en effet, la méthode que nous allons développer. — Mais pour connaître la dilatation d'un vase de verre d'une manière précise, il est indispensable, comme on l'a déjà indiqué (222), d'opérer directement sur ce vase lui-même ; et, d'autre part, on voit que, si l'on connaissait déjà la dilatation absolue *d'un seul liquide*, du mercure par exemple, et qu'on opérât avec ce liquide dans le vase qui doit servir aux expériences, on aurait la dilatation du vase en retranchant la dilatation apparente *observée* de la dilatation absolue.

On est donc définitivement conduit à effectuer ces diverses déterminations dans l'ordre suivant : 1° *détermination de la dilatation absolue du mercure* par un procédé direct, n'exigeant pas la connaissance de la dilatation du verre ; 2° *détermination de la dilatation de l'enveloppe*, au moyen de la dilatation du mercure ; 3° *détermination des dilatations absolues des autres liquides*, en employant la dilatation connue de l'enveloppe.

Nous allons exposer successivement les procédés qui ont été suivis pour arriver à ces divers résultats.

225. **Détermination du coefficient de dilatation absolue du mercure : principe de la méthode de Dulong et Petit.** — Deux tubes verticaux AB et CD (*fig.* 193), d'un diamètre assez considérable, communiquent par un tube capillaire deux fois recourbé BEFD, dont la branche EF est horizontale : on a introduit du mercure dans l'appareil. On refroidit jusqu'à 0°, au moyen de la glace fondante, le liquide contenu dans la branche AB, tandis qu'on échauffe à une température connue T celui de la branche CD ; il s'établit de part et d'autre une différence de densité, et par suite une différence de niveau. En raisonnant comme on l'a fait à l'occasion des vases communiquants qui renferment des liquides d'inégale densité (83), on voit que les hauteurs du mercure en m et en n, au-dessus de l'axe du tube horizontal EF, doivent être en raison inverse des densités du liquide dans les deux branches. En désignant donc par h_0 et d_0 la hauteur et la densité du mercure à 0°, par h et d la hauteur et la densité du mercure à T degrés, on a

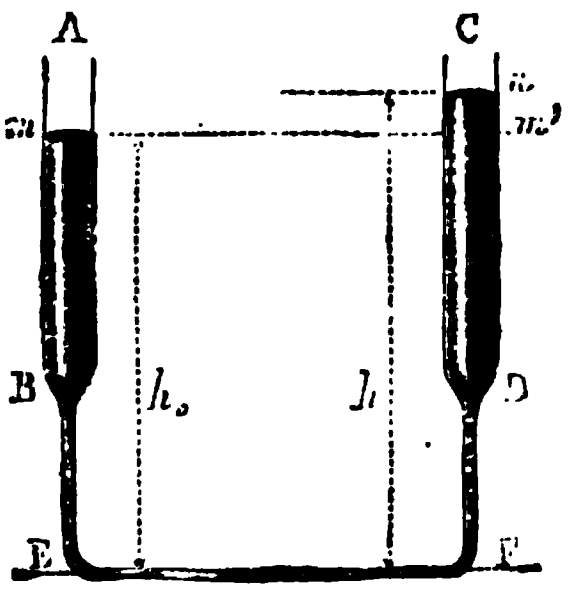


Fig. 193.

$$\frac{h}{h_0} = \frac{d_0}{d}$$

Mais d_0 et d sont inversement proportionnels aux volumes v_0 et v qu'oc-

cuperait une même masse de mercure, quelconque d'ailleurs, à 0° et à T degrés, c'est-à-dire que, en désignant par α le coefficient de dilatation absolue du mercure, on pourra écrire :

$$\frac{d_0}{d} = \frac{v_0(1+\alpha T)}{v_0} = 1 + \alpha T;$$

par suite

$$\frac{h}{h_0} = 1 + \alpha T.$$

De cette équation, on tire la valeur de α,

$$\alpha = \frac{h - h_0}{h_0 T}.$$

Pour déterminer le coefficient de dilatation absolue du mercure, α, il suffira donc de mesurer la température T, la différence $h - h_0$, la hauteur h_0, et de substituer les valeurs de ces quantités dans l'expression précédente.

* 226. **Appareil de Dulong et Petit.** — Le tube EF qui réunit les deux branches verticales était fixé à une règle de fonte MNP en forme de T (*fig.* 194), que l'on rendait horizontale au moyen de vis calantes et de deux niveaux à bulle d'air, placés à angle droit. Le tube AB était en-

Fig. 194. — Dilatation absolue du mercure, appareil de Dulong et Petit.

vironné d'un manchon de fer-blanc, qu'on emplissait de glace fondante; une tige de fer verticale, contenue dans le manchon et maintenue à 0° pendant toute l'expérience, se terminait à la partie supérieure, un peu au-dessus du niveau du mercure, par un crochet recourbé dont l'extrémité *r* servait de repère. — L'autre branche CD était entourée d'un manchon de cuivre, contenant de l'huile; un thermomètre à mercure *t* de forme par-

ticulière (thermomètre à poids [256]) et un thermomètre à air t' (258) en faisaient connaître la température. On échauffait l'huile au moyen d'un fourneau qui environnait le manchon de toutes parts.

Pour faire une observation, on laissait la température s'élever lentement jusque près du point qu'on voulait atteindre. On fermait alors toutes les ouvertures du fourneau ; le tirage étant arrêté, la température continuait à monter pendant quelques instants, puis atteignait un maximum où elle se maintenait assez longtemps stationnaire avant de redescendre. On profitait de cet instant pour exécuter les observations ; à cet effet, on versait dans la branche AB une petite quantité de mercure préalablement refroidi à 0°, de manière à faire passer le niveau dans l'autre branche de quelques millimètres au-dessus du couvercle, et l'on écartait un peu la glace autour du sommet de la colonne mercurielle en A. Les deux niveaux étant ainsi rendus visibles, on mesurait au cathétomètre les distances verticales du repère r au-dessus des plans de ces niveaux ; la différence de ces distances était évidemment égale à $h - h_0$. — En même temps, on notait les indications des deux thermomètres. — Enfin, la distance du repère r au-dessus de l'axe du tube EF ayant été déterminée une fois pour toutes, il suffisait d'en retrancher la distance du même repère au niveau du mercure froid, pour avoir la hauteur h_0.

227. **Résultats.** — Dulong et Petit ont assigné au coefficient de dilatation absolue du mercure, entre 0° et 100°, la valeur $\frac{1}{5550}$, ou bien, en fraction décimale, 0,000 18018, valeur très-peu différente de celle qui a été trouvée plus tard par M. Regnault, avec un appareil de dimensions plus grandes et pouvant fournir des résultats plus précis (*).

Fig. 193. Thermomètre à poids.

228. **Détermination du coefficient de dilatation d'une enveloppe de verre : procédé du thermomètre à poids.** — Soit une enveloppe de verre de forme cylindrique (*fig.* 195), comme celles que Dulong et Petit employaient pour ce genre d'étude, et qu'ils désignaient sous le nom de *thermomètre à poids* : on a soudé à la partie supérieure un tube effilé, recourbé de manière à pouvoir plonger dans une capsule pleine de mercure.

Après avoir déterminé le poids π de l'enveloppe vide, on l'emplit de mercure, en opérant à peu près comme pour emplir un thermomètre ordinaire : on environne alors l'appareil de glace fondante, la pointe étant plongée dans le mercure, et l'on détermine

(*) Dulong et Petit ont reconnu, en outre, que la dilatation absolue du mercure, entre 0° et 100°, est sensiblement proportionnelle à la température comptée sur le thermomètre à air. — Au delà de 100 degrés, le coefficient de dilatation augmente avec la température : d'après M. Regnault, le coefficient de dilatation moyen entre 0° et 300° est 0,000 18658.

son poids P lorsqu'il est plein de mercure à 0°; $P - \pi$ est le poids du mercure lui-même. — On porte enfin l'appareil à une température déterminée T (de 100°, par exemple). Le mercure se dilatant plus que l'enveloppe, une portion du liquide s'échappe par l'orifice du tube : on la recueille dans une petite capsule et on la pèse avec soin; soit p son poids.

Désignons maintenant par d_0 la densité du mercure à 0°, par α le coefficient de dilatation absolue du mercure, qui est connu, et par k le coefficient de dilatation cubique du verre, qui est l'inconnue du problème. Le volume total du mercure à 0° est $\frac{P - \pi}{d_0}$, représentons-le par V_0; c'est aussi le volume intérieur de l'enveloppe à cette température. — De même, le volume à 0° du mercure recueilli est $v_0 = \frac{p}{d_0}$; et $v_0 (1 + \alpha T)$ est le volume de ce même mercure à la température T à laquelle il est sorti de l'appareil. — Le volume total du mercure, en passant de 0° à T degrés, s'est accru de $V_0 \alpha T$; celui de l'enveloppe, de $V_0 k T$; l'excès de la première de ces quantités sur la seconde est égal au volume occupé à T degrés par le mercure expulsé, c'est-à-dire à $v_0 (1 + \alpha T)$. On a donc l'équation :

$$V_0 \alpha T - V_0 k T = v_0 (1 + \alpha T);$$

ou, en remplaçant v_0 et V_0 par leurs valeurs en fonction des données immédiates de l'expérience, et supprimant les facteurs communs,

$$(1) \qquad (P - \pi)(\alpha - k) T = p (1 + \alpha T)$$

d'où l'on déduit la valeur du coefficient de dilatation de l'enveloppe

$$k = \alpha - \frac{p(1 + \alpha T)}{(P - \pi) T}.$$

229. **Détermination du coefficient de dilatation absolue d'un liquide quelconque.** — En reprenant l'enveloppe dont on vient de déterminer le coefficient de dilatation, et la remplissant du liquide dont on veut obtenir le coefficient de dilatation absolue α', on effectuera avec ce liquide toutes les déterminations correspondantes à celles qui avaient été effectuées avec le mercure. On aura alors une équation semblable à l'équation (1) du paragraphe précédent, et dans laquelle la seule quantité inconnue sera maintenant α'. Il suffira donc de tirer de cette équation la valeur de α',

$$\alpha' = \frac{(P' - \pi') k T' + p'}{(P' - \pi' - p') T'};$$

et de substituer dans cette expression, aux diverses quantités, les valeurs numériques fournies par l'expérience.

230. **Dilatations apparentes.** — Ayant déterminé la dilatation absolue d'un liquide et celle de l'enveloppe qui le contient, il suffira de re-

trancher la seconde de la première pour obtenir la dilatation apparente de ce liquide dans l'enveloppe.

C'est ainsi que Dulong et Petit ont obtenu, pour la dilatation apparente du mercure dans le verre, le nombre $\frac{1}{6480}$, en retranchant du coefficient de dilatation absolue du mercure, savoir $\frac{1}{5550}$, le coefficient de dilatation cubique du verre de leur thermomètre à poids.

Il est clair d'ailleurs que ce nombre doit éprouver, d'une espèce de verre à l'autre, de légères variations.

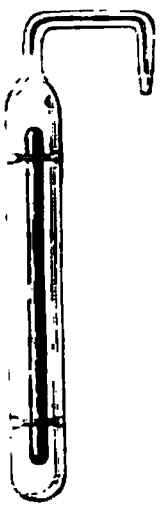


Fig. 196.

* 231. **Application du thermomètre à poids à la détermination directe des dilatations cubiques des corps solides.** — Dulong et Petit ont également employé le procédé du thermomètre à poids pour déterminer les dilatations cubiques des corps solides, et en particulier d'un certain nombre de métaux.

On donnait au corps sur lequel on voulait opérer la forme d'un petit cylindre, et on l'introduisait dans le réservoir du thermomètre à poids, avant que celui-ci fût fermé (*fig.* 196); on emplissait ensuite l'appareil de mercure, et l'on exécutait la même série d'opérations que pour la recherche de la dilatation d'un liquide quelconque (*).

Soit m le poids du cylindre solide, D sa densité à 0° et x son coefficient de dilatation cubique : $\frac{m}{D}$ est le volume de ce cylindre à 0°, et $\frac{m}{D}x$ T représente l'augmentation de volume qu'il a éprouvée en passant de 0° à T degrés. — Soit P le poids du mercure que l'appareil contient à 0°; et d la densité de ce liquide à la même température; $\frac{P}{d}$ est le volume total du mercure à 0°, et $\frac{P}{d}\alpha T$ son augmentation de volume entre 0° et T degrés, α étant son coefficient de dilatation absolue. — Le volume intérieur de l'enveloppe à 0° est égal à la somme des volumes du cylindre métallique et du mercure qu'elle contient, c'est-à-dire à $\frac{m}{D}+\frac{P}{d}$; l'augmentation de ce volume, de 0° à T degrés est $\left(\frac{m}{D}+\frac{P}{D}\right)kT$, k étant le coefficient de dilatation cubique de l'enveloppe. — Enfin, si l'on désigne par p

(*) Lorsqu'on voulait opérer sur les métaux capables de se combiner directement avec le mercure, sur le cuivre ou l'or par exemple, on avait soin d'en oxyder légèrement la surface par l'action de la chaleur, ou de la couvrir d'une mince couche de vernis.

le poids du mercure sorti pendant l'expérience, $\frac{p}{d}$ représente le volume de ce mercure à 0°; $\frac{p}{d}(1+\alpha T)$ est donc le volume de ce même mercure à la température à laquelle il est sorti de l'appareil. Nous allons exprimer que ce dernier volume est égal à l'excès de la somme des dilatations du mercure et du cylindre solide sur la dilatation de l'enveloppe; nous aurons ainsi, pour déterminer x, l'équation suivante :

$$\frac{p}{d}(1+\alpha T)=\frac{m}{D}xT+\frac{P}{d}\alpha T-\left(\frac{m}{D}+\frac{P}{d}\right)kT.$$

232. **Méthode des thermomètres comparés, pour la détermination des coefficients de dilatation absolue des liquides.** — La méthode du thermomètre à poids s'applique difficilement à la recherche des coefficients de dilatation de liquides très-volatils. On la remplace alors par la méthode des thermomètres comparés, dont l'idée est due à Deluc, et qui a été appliquée par M. Pierre à la détermination des coefficients de dilatation d'un grand nombre de liquides. — Cette méthode consiste à suivre comparativement la marche d'un thermomètre renfermant le liquide sur lequel on veut opérer et celle d'un thermomètre à mercure (*).

La tige du thermomètre qui doit contenir le liquide étant supposée bien cylindrique et divisée en parties d'égale longueur, on détermine d'abord le rapport entre la capacité du réservoir, comptée jusqu'à l'origine de la graduation, et la capacité d'une division de la tige (**).

On cherche ensuite le coefficient de dilatation cubique de cette enve-

(*) Pour définir avec plus de précision les températures, on avait comparé préalablement le thermomètre à mercure lui-même au thermomètre à air.

(**) Cette opération s'exécute de la manière suivante : — On emplit de mercure le réservoir et la tige, en entoure entièrement le thermomètre de glace fondante, et l'on note le numéro d'ordre N de la division à laquelle le liquide s'arrête. On retire alors le thermomètre de la glace, puis, lorsqu'il a repris la température de l'air environnant, on en fait la tare sur une balance précise. — On fait sortir ensuite, en chauffant un peu le réservoir, une quantité de mercure telle que, à 0°, le liquide restant s'arrête à une division voisine de l'origine de la graduation; après avoir noté le numéro d'ordre n de cette division, on détermine la diminution de poids p de l'appareil; on a ainsi le poids du mercure qui occupait à zéro $N-n$ divisions de la tige. — On vide enfin complétement le thermomètre, et l'on détermine la nouvelle diminution de poids P; cette quantité exprime le poids du mercure qui occupait à 0° la capacité du réservoir, comptée jusqu'à l'origine de la graduation, plus n divisions de la tige. — Soit x le rapport cherché, c'est-à-dire le nombre qui exprime combien de fois la capacité du réservoir contient celle d'une division; on peut dire que P représente le poids du mercure qui occuperait à zéro $x+n$ divisions; mais les poids P et p sont évidemment proportionnels aux volumes qui leur correspondent; donc :

$$\frac{x+n}{N-n}=\frac{P}{p};$$

d'où l'on tire

$$x=\frac{P}{p}(N-n)-n.$$

loppe. — A cet effet, on y introduit du mercure comme s'il s'agissait de construire un thermomètre ordinaire, et l'on porte l'appareil successivement dans la glace fondante et dans la vapeur d'eau bouillante. Soit v_0 le volume du mercure à 0°, c'est-à-dire le nombre total de divisions qu'il occupe, y compris celles que représente le réservoir; soit v son volume apparent à 100°, c'est-à-dire le nombre de divisions dilatées qu'il occupe à cette température; le volume réel du liquide à 100° est $v(1+100k)$, k étant le coefficient de dilatation de l'enveloppe. L'augmentation réelle du volume du mercure est donc $v(1+100k)-v_0$; en la divisant par le volume initial v_0 et par la variation de température, laquelle est de 100 degrés, on obtient un quotient qui doit être égal au coefficient de dilatation absolue du mercure, savoir $\frac{1}{5550}$. On a donc l'équation :

$$\frac{v(1+100k)-v_0}{100\,v_0}=\frac{1}{5550};$$

équation d'où l'on peut tirer la valeur de k.

Ces recherches préliminaires étant terminées, on retire le mercure, on introduit le liquide sur lequel on veut opérer et l'on ferme le thermomètre. On détermine, comme précédemment, le volume u_0 de ce liquide à 0°, puis son volume apparent u à une température t, donnée par le thermomètre à mercure (*). Le coefficient moyen de la dilatation absolue du liquide, entre 0° et t degrés, s'exprime par :

$$x=\frac{u(1+kt)-u_0}{u_0 t},$$

k étant le coefficient de dilatation cubique de l'enveloppe, qui est connu.

233. **Variations du coefficient de dilatation absolue d'un même liquide à diverses températures.** — Lorsqu'on détermine les *coefficients moyens* de la dilatation absolue d'un liquide entre 0° et des températures de plus en plus élevées, on trouve des nombres qui croissent en général d'une manière très-rapide, surtout pour les liquides très-volatils. Donc, à mesure que la température du liquide s'élève, l'accroissement de volume pour une élévation de température de 1 degré, rapporté au volume initial, augmente rapidement.

* M. Pierre a déduit par le calcul, d'un grand nombre d'expériences, les *coefficients vrais* de dilatation de divers liquides, soit à la température de 0°, soit à la température d'ébullition; c'est-à-dire l'accroissement éprouvé par l'unité de volume en passant, soit de 0° à 1°, soit de la température d'ébullition à cette même température augmentée de 1 degré.

(*) Pour faire cette observation, on suspend les deux thermomètres dans une cuve fermée sur l'une de ces faces par une glace de verre, et contenant de l'eau ou de l'huile; on chauffe le liquide à l'aide de lampes, ou d'un fourneau placé au-dessous de la cuve.

Nous transcrivons ici quelques-uns des résultats qu'il a obtenus : pour un même liquide, les nombres contenus dans l'une ou l'autre colonne présentent entre eux des différences frappantes.

NOMS des SUBSTANCES.	COEFFICIENTS DE DILATATION VRAIS : A ZÉRO.	COEFFICIENTS DE DILATATION VRAIS : A LA TEMPÉRATURE d'ébullition.	TEMPÉRATURES D'ÉBULLITION.
Alcool.....	0,001 049	0,001 196	78,3
Éther.....	0,001 513	0,001 647	35,5
Aldéhyde.....	0,001 654	0,001 827	22,0
Sulfure de carbone....	0,001 140	0,001 249	47,9
Brome.....	0,001 038	0,001 168	63,0
Chloroforme.....	0,001 107	0,001 320	65,5

*234. **Coefficients de dilatation des liquides très-volatils, à des températures très-supérieures à leur point d'ébullition normal.** — Lorsqu'on enferme un liquide très-volatil dans une enveloppe suffisamment résistante, il est possible, ainsi que l'a établi Cagniard de Latour, de le porter à une température extrêmement élevée sans que l'ébullition se produise ; on peut donc étudier, dans ces conditions, la dilatabilité du liquide à des températures bien supérieures à celle de son point d'ébullition normal.

Cette étude a été faite par M. Drion : il a reconnu que le coefficient de dilatation vrai des liquides volatils va en augmentant de plus en plus rapidement avec la température, et qu'il peut même atteindre des valeurs égales à deux et trois fois celle du coefficient de dilatation de l'air, que nous ferons connaître un peu plus loin. — Voici quelques nombres tirés de ce travail.

NOMS des SUBSTANCES.	COEFFICIENTS DE DILATATION VRAIS : A 0°.	A 50°.	A 90°.	A 130°.
Acide hypoazotique.....	0,001 446	0,002 021	0,003 081	»
Éther chlorhydrique.....	0,001 485	0,002 045	0,002 910	0,005 031
Acide sulfureux.....	0,001 754	0,002 558	0,004 147	0,009 571

235. **Maximum de densité de l'eau.** — Lorsqu'on refroidit simultanément un thermomètre à eau et un thermomètre à mercure, à partir de

10° par exemple, on voit d'abord le liquide baisser à la fois dans les deux instruments ; mais, quand la température descend au-dessous de 4°, le niveau du mercure continuant à descendre, celui de l'eau remonte. — Il y a donc, aux environs de 4°, une température à laquelle le volume de l'eau est le plus petit possible, c'est-à-dire à laquelle la densité du liquide est la plus grande possible.

* 236. **Expériences de Despretz.** — L'expérience conduite comme nous venons de la décrire ne ferait connaître que la température à laquelle le volume *apparent* est un minimum : pour trouver la température qui correspond au minimum de volume *réel*, c'est-à-dire au maximum de densité de l'eau, il faut tenir compte de la dilatation de l'enveloppe. — C'est ce qu'a fait Despretz, dans un travail qui lui a permis de fixer à 4° la température exacte du maximum de densité de l'eau. — Ce physicien a déterminé aussi les volumes et les densités de l'eau, de degré en degré, en prenant pour unité le volume et la densité de l'eau à 4°.

Nous extrayons de son mémoire les nombres suivants :

TEMPÉRATURES.	VOLUME DE L'EAU.	DENSITÉS DE L'EAU
0°	1,000 127	0,999 873
4°	1,000 000	1,000 000
10°	1,000 269	0,999 731
20°	1,001 79	0,998 213
30°	1,004 33	0,995 688
40°	1,007 73	0,992 329
50°	1,012 05	0,988 093
100°	1,043 15	0,958 634

Despretz ayant remarqué, en outre, que l'on peut abaisser jusque vers — 20° la température d'un thermomètre à eau bien purgé d'air, sans que le liquide se congèle, a profité de cette observation pour étudier les changements de volume de l'eau liquide à des températures inférieures à 0°. Il a reconnu que, dans ces circonstances, la dilatation, qui commence à 4°, se poursuit encore au-dessous de 0°, jusqu'au moment où enfin la congélation se produit.

Le même procédé lui a permis de découvrir un maximum de densité pour un grand nombre de solutions salines ; ce maximum se manifeste, en général, à des températures inférieures à celles auxquelles ces solutions se congèlent dans les circonstances ordinaires.

237. **Démonstration expérimentale du maximum de densité de l'eau.** — On constate, dans les cours, l'existence du maximum de densité de l'eau, au moyen de l'expérience suivante. — Une éprouvette de verre M (*fig.* 197) contient de l'eau ; deux thermomètres A et B plongent, l'un dans les couches supérieures du liquide, l'autre dans les couches inférieures ; le manchon métallique C, qui entoure la partie moyenne de l'éprouvette, contient de la glace. L'eau de l'éprouvette étant primitivement à 10°, par exemple, on voit bientôt les deux ther-

momètres indiquer un abaissement de température ; mais le thermomètre inférieur baisse plus vite que le thermomètre supérieur, les couches d'eau refroidies acquérant d'abord une plus grande densité, et gagnant successivement le fond du vase. Lorsque B est arrivé à 4°, il demeure stationnaire, tandis que A continue à descendre et arrive bientôt aussi à cette même température. Enfin, à partir de ce moment, A continue à descendre encore, parce que les couches d'eau refroidies au-dessous de 4° par la glace acquièrent une densité moindre et tendent à s'élever ; mais la température du thermomètre B demeure toujours sensiblement constante.

Cette expérience permet de concevoir comment, dans les lacs, la température de l'eau, à partir d'une certaine profondeur, demeure invariablement égale à 4°, soit pendant les chaleurs de l'été, soit pendant les froids de l'hiver. Les variations de température de la surface, qui se font sentir jusqu'à une certaine distance, donnent toujours à l'eau une densité moindre que celle des parties profondes. Il n'y a donc pas de raison pour que la température devienne uniforme dans la masse, par le mélange des diverses couches de liquide.

Fig. 197.

III. — DILATATIONS DES GAZ.

238. **Coefficient de dilatation d'un gaz, sous pression constante.** — *Le coefficient de dilatation d'un gaz, sous pression constante, est le nombre qui exprime l'accroissement, éprouvé par l'unité de volume de ce gaz, lorsque sa température s'élève de 1 degré, la pression restant constante.* — Comme dans tous les cas semblables, ce nombre doit être considéré comme exprimé au moyen de la même unité que le volume lui-même.

239. **Loi de Gay-Lussac et loi de Davy, relatives aux coefficients de dilatation des gaz.** — Les premières expériences précises qui aient été faites en vue de mesurer la dilatation des gaz datent de 1807 et sont dues à Gay-Lussac ; elles ont établi la loi suivante :

Tous les gaz ont, entre 0° et 100°, le même coefficient de dilatation. (Loi de Gay-Lussac.)

A la même époque à peu près, sir Humphry Davy arrivait à un autre résultat, plus général encore que le précédent.

Le coefficient de dilatation des gaz est indépendant de la pression qu'ils supportent. (Loi de Davy.)

Des expériences plus récentes, dues à MM. Rudberg, Magnus et Regnault, ont montré que les lois énoncées par Gay-Lussac et par Davy se vérifient très-sensiblement pour les gaz permanents, mais qu'elles cessent d'être rigoureusement applicables à ceux qui sont voisins de leur point de liquéfaction.

240. **Formules relatives à la dilatation des gaz, sous pression constante.** — Si l'on désigne par α le coefficient de dilatation d'un gaz, par V_0, V et V′ les volumes qu'occupe, *sous une pression constante*, une même masse de ce gaz portée tour à tour aux températures de 0°, t et t' degrés, on a, entre ces diverses quantités, les relations :

$$(1)\qquad \begin{cases} V = V_0(1 + \alpha t) \\ V_0 = V\dfrac{1}{1 + \alpha t} \\ V' = V\dfrac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}. \end{cases}$$

Ces formules, tout à fait semblables à celles que nous avons établies pour les dilatations des corps solides (220), supposent que la pression du gaz n'a pas varié. — Si la pression varie en même temps que la température, et si l'on admet que le coefficient de dilatation α soit indépendant de la pression, conformément à la loi de Davy, on aura à résoudre le problème suivant :

241. **Problème général.** — *Étant donné le volume* V *d'une masse gazeuse à la température de* t *degrés et sous la pression* H, *trouver le volume* V′ *de la même masse à* t′ *degrés et sous la pression* H′. — Supposons d'abord que la pression seule varie, et désignons par V_1 le volume qu'occuperait le gaz à t degrés et sous la pression H′ ; on aura, d'après la loi de Mariotte :

$$V_1 = V\frac{H}{H'}.$$

En faisant varier à son tour la température, on déduira, du volume V_1, le volume V′ du gaz pour la température t' et la même pression, savoir :

$$V' = V_1\frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

Remplaçant, dans cette dernière formule, V_1 par sa valeur, il vient :

$$(2)\qquad V' = V \times \frac{H}{H'} \times \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}\ (*)$$

Remarque. — Lorsque le volume d'une même masse gazeuse devient double, triple, etc., sa densité se réduit à la moitié, au tiers, etc., de ce

(*) D'après la loi de Davy (239), le même nombre α peut être considéré comme représentant le coefficient de dilatation du gaz, aussi bien sous la pression H′ que sous la pression H.

qu'elle était d'abord : en d'autres termes, la densité d'une masse de gaz varie en raison inverse de son volume. Si donc on désigne par D la densité d'un gaz à t degrés et sous la pression H, par D′ la densité du même gaz à t' degrés et sous la pression H′, par V et V′ les volumes respectifs d'une même masse de ce gaz dans les conditions mentionnées, on a

$$\frac{D'}{D}=\frac{V}{V'};$$

mais la formule (2) donne

$$\frac{V}{V'}=\frac{H'}{H}\times\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t'}.$$

En substituant, on trouve

$$D'=D\times\frac{H'}{H}\times\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t'}. \qquad (3)$$

242. Évaluation du volume ou de la densité d'une masse gazeuse, dans les conditions normales de température et de pression. — L'un des problèmes que l'on a le plus fréquemment à résoudre est celui où, connaissant le volume ou la densité d'un gaz à une température t et sous une pression H, on cherche le volume ou la densité dans les *conditions normales de température et de pression*, c'est-à-dire à 0° et sous la pression de 760 millimètres. — Pour obtenir les formules relatives à ce cas particulier, il suffit, dans les formules (2) et (3), de supposer $t'=0$ et H′ = 760. Il vient alors, en désignant par V_0 et D_0 le volume et la densité dans ces conditions,

$$V_0=V\frac{H}{760}\frac{1}{1+\alpha t}, \qquad (4)$$

$$D_0=D\frac{760}{H}(1+\alpha t). \qquad (5)$$

Nous ferons souvent usage de ces formules, dans les applications des dilatations des gaz.

243. Mesure des dilatations des gaz. — Expériences de Gay-Lussac. — Le gaz, préalablement desséché, est introduit dans un réservoir thermométrique AB (*fig.* 198), dont la tige est divisée en parties d'égal volume. On a déterminé, par une expérience préliminaire, le rapport entre la capacité du réservoir et celle d'une division de la tige (*). Une petite colonne de mercure *mn* sépare de l'atmosphère extérieure le gaz contenu dans l'appareil. — Le tube étant placé dans une position horizontale, on le porte successivement aux températures de la glace fondante et de la vapeur d'eau bouillante; à chacune de ces deux températures, on note la position de l'index de mercure. — Désignons par V_0 le nombre de divisions (y compris celles que représente la capacité du réservoir) occupées par le

(*) Voir la seconde note de la page 187.

gaz à 0°, par V son volume apparent, ou le nombre de divisions dilatées qu'il occupe à la température T de l'eau bouillante, et par k le coefficient de dilatation cubique du verre ; le volume réel du gaz à la température T

Fig. 198. — Dilatation des gaz ; appareil de Gay-Lussac.

sera $V(1+kT)$, et par suite le coefficient de dilatation α du gaz sur lequel on a opéré sera :

$$\alpha = \frac{V(1+kT) - V_0}{V_0 T}.$$

Gay-Lussac, en suivant cette méthode, a trouvé, pour l'air et pour les divers gaz qu'il a étudiés, le nombre un peu trop élevé 0,00375.

Fig. 199.

L'introduction de l'air et sa dessiccation se faisaient de la manière suivante. — On emplissait d'abord de mercure la boule et le tube, absolument comme s'il s'était agi de construire un thermomètre ordinaire ; on faisait bouillir le liquide, puis on adaptait à l'extrémité de la tige un tube plus large CC′ (*fig.* 199), contenant des fragments de chlorure de calcium. On renversait ensuite l'appareil, comme l'indique la figure ci-contre, et, à l'aide d'un fil de platine qu'on introduisait dans le tube capillaire, on déterminait la sortie du mercure qui se trouvait ainsi remplacé par de l'air desséché. Avec quelques précautions, on parvenait à n'avoir plus dans le tube que la petite colonne de mercure qui devait servir d'index dans les expériences.

On disposait ensuite l'appareil, comme l'indique la figure 198, dans une caisse métallique DD′, où on le portait successivement aux températures de la glace fondante et de la vapeur d'eau bouillante, et l'on observait les positions occupées par l'index, en retirant toujours le tube AB jusqu'à ce que l'extrémité m de la petite colonne de mercure vînt se montrer à l'orifice o.

Deux causes d'erreur principales ont été signalées dans les expériences

de Gay-Lussac : 1° l'imparfaite dessiccation du gaz ; 2° l'insuffisance de l'index mercuriel, pour le séparer de l'atmosphère extérieure ; on peut facilement s'assurer, en effet, que si, après avoir porté l'appareil à la température de l'eau bouillante, on le ramène à 0°, l'index ne revient jamais à son point de départ. — De là, la nécessité de reprendre ces déterminations avec des méthodes plus précises. C'est ce qu'ont fait MM. Rudberg en Suède, Magnus à Berlin, et Regnault à Paris. Nous nous contenterons d'indiquer la méthode suivie par M. Regnault.

244. Expériences de M. Regnault pour la détermination du coefficient de dilatation des gaz sous pression constante. — Le gaz est contenu dans un ballon de verre (*fig.* 200), et communique par un tube capillaire Cc avec un manomètre à air libre *c*Rq, muni en R d'un *ro-*

Fig. 200. — Dilatation des gaz sous pression constante ; appareil de M. Regnault

binet à trois voies. Deux traits de repère sont tracés sur le verre, l'un au-dessus, l'autre au-dessous du renflement de la petite branche, à peu près aux points désignés sur la figure par *a* et *c*. Le tube capillaire est formé de deux parties, réunies entre elles par un tube métallique en forme de T. Dans la troisième branche du T, est mastiqué un petit tube de verre vertical *a*, permettant de faire communiquer l'appareil, soit avec une machine pneumatique, soit avec un réservoir qui contient le gaz sur lequel

on doit opérer. Le ballon est placé dans une chaudière de métal, à double enveloppe, disposée comme celle qui sert à déterminer le centième degré du thermomètre (*fig.* 186).

La première opération consiste à dessécher le ballon et à l'emplir d'air sec. — A cet effet, on introduit un peu de mercure dans le manomètre, et l'on tourne le robinet R de manière à intercepter la communication entre les deux branches, en le plaçant dans la position 1 (*fig.* 201). On chauffe alors le ballon à 100°, afin de vaporiser l'humidité adhérente au verre; on fait le vide dans l'appareil, et on laisse rentrer de l'air ou du gaz, qui se dessèche en traversant des tubes à ponce sulfurique; on fait encore le vide, on laisse entrer une nouvelle quantité de gaz sec, et ainsi de suite, de manière à être certain que l'appareil ne contient plus trace d'humidité.

Fig. 201.

On entoure ensuite le ballon de glace fondante, on rétablit la communication entre les deux branches du manomètre, en plaçant le robinet R dans la position 2, et l'on verse du mercure en *q*, de manière à en amener le niveau dans la branche fermée au trait supérieur *c*; le liquide s'élève alors à la même hauteur de part et d'autre. On fond le tube de verre *a*, et on le ferme à la lampe. On note, en même temps, la hauteur H du baromètre et la température extérieure *t*.

Enfin, on enlève la glace fondante et on la remplace par de l'eau qu'on porte à l'ébullition. Le gaz se dilate, une portion passe dans le renflement, en même temps que le niveau du mercure baisse à gauche et s'élève à droite, par suite de l'augmentation de force élastique. On fait alors couler du liquide par le robinet R, en le tournant dans la position 3, afin de diminuer la pression : les dimensions du ballon et de la capacité *ca* ont été prises de façon que le niveau du mercure arrive au trait inférieur *s* lorsque les deux colonnes mercurielles n'offrent plus qu'une différence de hauteur de quelques millimètres. On détermine alors la force élastique H′ du gaz, laquelle est exprimée par la hauteur barométrique augmentée ou diminuée de la petite différence de hauteur du mercure dans les deux branches; on détermine également la température *t′* marquée par le thermomètre.

Ces données suffisent, avec la connaissance des volumes des diverses parties de l'appareil, pour le calcul du coefficient de dilatation. Nous désignerons par V_0 le volume du ballon à la température de 0°; par *v* le volume, à *t* degrés, du tube capillaire et de la partie supérieure du mano-

mètre, jusqu'au premier trait c ; par u le volume compris, à la même température, entre les deux traits c et s. Nous allons calculer le volume total du gaz, ramené à la température de 0° et à la pression de 760 millimètres. Ce volume peut s'exprimer, soit au moyen des données fournies par l'expérience faite à 0°, soit au moyen des données fournies par l'expérience faite à la température T de la vapeur d'eau bouillante ; en égalant entre elles ces deux expressions d'un même volume, nous obtiendrons une équation d'où nous pourrons tirer la valeur de α.

Dans la première expérience, l'air occupait, sous la pression H : 1° le volume V_0 du ballon à la température 0° ; 2° le volume v du tube à la température t. En ramenant tout à 0° et à la pression de 760 millimètres, et appliquant les formules de dilatation et la loi de Mariotte (242), on a, pour le volume total dans ces conditions :

$$V_0 \frac{H}{760} + v \frac{H}{760} \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

— Dans la seconde expérience, le ballon étant à T degrés, son volume devient $V_0 (1 + kT)$, k étant le coefficient de dilatation cubique du verre (*) ; le volume $v + u$, qui est maintenant à t' degrés, devient de son côté $(v + u) \frac{1 + kt'}{1 + kt}$. Ainsi, le gaz occupe en définitive, sous la pression H' : 1° le volume $V_0 (1 + kT)$ du ballon à la température de T degrés ; 2° le volume $(v + u) \frac{1 + kt'}{1 + kt}$ du tube à la température t'. En ramenant encore tout à 0° et à la pression de 760 millimètres, on obtient, pour deuxième expression du volume du gaz, dans ces conditions :

$$V_0 (1 + kT) \frac{H'}{760} \frac{1}{1 + \alpha T} + (v + u) \frac{1 + kt'}{1 + kt} \frac{1}{1 + \alpha t'} \frac{H'}{760},$$

En égalant ces deux expressions, on aura l'équation du problème. — Cette équation se simplifie beaucoup si les deux températures t et t' sont égales, ainsi que les deux pressions H et H' ; elle devient alors :

$$V_0 = V_0 \frac{1 + kT}{1 + \alpha T} + u \frac{1}{1 + \alpha t} ;$$

équation dont il est facile de tirer α.

Pour l'air en particulier, M. Regnault a trouvé pour le coefficient de dilatation α la valeur 0,00367, qui a été adoptée par les physiciens.

245. **Valeur des coefficients de dilatation des divers gaz, sous pression constante.** — Le tableau suivant renferme, pour les principaux gaz, les nombres qui ont été déduits des expériences de

(*) Ce coefficient avait été déterminé sur un thermomètre à poids, fait du même verre que le ballon (228).

M. Regnault, sous une pression sensiblement égale à la pression atmosphérique.

NOMS DES GAZ	COEFFICIENTS DE DILATATION.
Hydrogène	0,006361
Air.	0,003670
Oxyde de carbone	0,003669
Acide carbonique.	0,003710
Protoxyde d'azote	0,003719
Cyanogène.	0,003877
Acide sulfureux	0,003903

On voit que les trois premiers gaz, qui sont des gaz permanents, ont des coefficients de dilatation très-sensiblement égaux. Au contraire, pour les quatre autres gaz, notamment pour l'acide sulfureux qui est le plus facile à liquéfier, les coefficients de dilatation atteignent des valeurs beaucoup plus grandes. — La loi de Gay-Lussac (239) n'est donc applicable, avec une exactitude suffisante, qu'aux gaz permanents.

246. **Variations du coefficient de dilatation d'un même gaz, sous pression constante, pour différentes valeurs de la pression.** — L'appareil précédemment décrit, un peu modifié, a également servi à M. Regnault pour mesurer la dilatation de plusieurs gaz sous des pressions supérieures à la pression atmosphérique, la pression conservant d'ailleurs toujours sensiblement la même valeur pendant la durée d'une même expérience.

Pour l'hydrogène, les nombres trouvés en opérant sous des pressions très-différentes sont si voisins l'un de l'autre, qu'on peut attribuer la différence qu'ils présentent aux erreurs d'expérimentation. Pour l'air et l'acide carbonique, le coefficient de dilatation augmente avec la pression ; mais cette augmentation est surtout sensible pour l'acide sulfureux, et en général pour les gaz facilement liquéfiables. — Donc, quand les valeurs de la pression sont très-différentes, la loi de Davy (239) ne peut être appliquée, sans erreur sensible, qu'aux gaz permanents.

En résumé, les recherches de M. Regnault établissent, ainsi que nous l'avions dit en commençant, que les lois de Gay-Lussac et de Davy s'appliquent d'une manière très-approximative aux gaz permanents; mais qu'elles ne peuvent être étendues sans erreur aux gaz faciles à liquéfier. — Tout porte à croire que ces lois, de même que la loi de Mariotte, conviendraient à tous les gaz, si l'on pouvait les étudier sous des pressions très-faibles ou à des températures très-élevées, en un mot très-loin de leurs points de liquéfaction respectifs.

CHAPITRE III

APPLICATIONS DES DILATATIONS

I. — APPLICATION DES DILATATIONS DES CORPS SOLIDES.

247. Corrections des mesures linéaires. — Lorsqu'on fait usage d'une règle divisée, pour mesurer une longueur, il faut, si l'on veut obtenir toute la précision possible, tenir compte de la température à laquelle la mesure est effectuée.

Le plus ordinairement, les graduations sont supposées faites à la température de 0°, c'est-à-dire que les divisions d'une règle partagée en millimètres, par exemple, ne sont réellement des millimètres qu'à cette température. Admettons donc que, pour mesurer une longueur, on se soit servi d'une règle de laiton, et que, à la température de t degrés, on ait trouvé un nombre de divisions égal à l. Chaque division devient, à t degrés, $1^{mm}\ (1 + \gamma t)$, γ étant le coefficient de dilatation linéaire du laiton. Les l divisions observées valent donc, en réalité :

$$l\,(1 + \gamma t) \text{ millimètres.}$$

Ainsi, la correction consiste à multiplier le nombre de divisions observées par le binôme de dilatation $1 + \gamma\ t$, relatif à la température à laquelle la lecture est faite.

248. Pendules compensateurs. — L'isochronisme des petites oscillations du pendule (51) a permis d'employer cet instrument pour régulariser le mouvement des horloges, en rendant ce mouvement solidaire de celui d'un pendule, ou balancier. Mais comme la longueur du pendule augmente quand la température s'élève, et diminue quand la température s'abaisse, l'horloge retarde dans le premier cas et avance dans le second (52, 2°); on cherche alors, par des dispositions particulières, à rendre sensiblement invariable la longueur du pendule, ou, comme on dit, à *compenser* l'effet des changements de température.

On a vu plus haut que, pour un pendule formé d'une sphère pesante, suspendue à l'extrémité d'un fil très-léger, la *longueur* est la distance du point de suspension au centre de la sphère (50). — Les balanciers qu'on emploie dans l'horlogerie se terminent, à la partie inférieure, par une lentille, ou par une autre masse dont le poids l'emporte de beaucoup sur celui du reste de la partie oscillante. Pour de semblables pendules, la *longueur*, définie comme précédemment, ne diffère jamais beaucoup de la distance du point de suspension au centre de gravité de la masse pesante; c'est cette distance que l'on cherche à rendre constante, quelle que soit la température.

* 249. **Pendule de Graham.** — Le pendule compensateur le plus anciennement employé, celui qu'on s'accorde à regarder aujourd'hui encore comme le meilleur, a été imaginé par l'horloger anglais Graham.

Il est composé d'une tige d'acier AB (*fig.* 202), terminée à la partie inférieure par un étrier CC, également en acier, lequel supporte un cylindre de verre M contenant du mercure. Lorsque la température s'élève, le centre de gravité du pendule tend à s'abaisser par la dilatation de la tige et des côtés verticaux de l'étrier; mais, en même temps, le centre de gravité tend à remonter par la dilatation du mercure lui-même : le calcul montre que la compensation est possible, et que, une fois réalisée pour une variation de température particulière, elle l'est aussi pour toute autre (*).

Fig. 202. Fig. 203.
Pendule de Graham.

On dispose quelquefois le pendule de Graham comme le représente la figure 203, en répartissant le mercure dans deux éprouvettes M, M, placées symétriquement de part et d'autre du prolongement de la tige AB.

250. **Pendule de Leroy, ou à gril.** — Les figures 204 et 205 représentent le système compensateur le plus fréquemment employé. Il est dû à l'horloger Julien Leroy. — La lentille pesante C est reliée au point de suspension par une série de tiges et de cadres, alternativement en fer et en laiton. En examinant la figure 204, où les tiges de laiton se distinguent des tiges de fer par des hachures transversales, on voit que l'en-

(*) Voir la démonstration dans les problèmes qui sont à la fin du volume.

semble est disposé de manière que la dilatation de toutes les tiges longitudinales de fer tende à abaisser le centre de la lentille, et que la dilatation des tiges de laiton tende à le relever. Comme la longueur totale du métal le plus dilatable, c'est-à-dire du laiton, est moindre que celle du fer, on conçoit qu'il soit possible de compenser l'allongement du premier par celui du second.

La longueur totale du fer à zéro étant représentée par $a + a' + a'' + a'''$, l'allongement qu'elle éprouve en passant de zéro à t degrés est, en désignant par γ le coefficient de dilatation du métal,

$$(a + a' + a'' + a''')\gamma t;$$

de même, $b + b'$ étant la longueur totale du laiton à zéro et γ son coefficient de dilatation, l'allongement correspondant est

$$(b + b')\,\gamma' t.$$

Fig. 204. Fig. 205.
Pendule à gril.

Pour qu'il y ait compensation à t degrés, il faut et il suffit que l'on ait

$$(a + a' + a'' + a''')\gamma t = (b + b')\gamma' t,$$

ou

$$\frac{a + a' + a'' + a'''}{b + b'} = \frac{\gamma'}{\gamma}.$$

On voit que ce résultat est indépendant de la température. Donc la compensation, une fois réalisée par une température particulière, subsiste à toute autre température. — Pour le fer et le laiton, le rapport $\frac{\gamma'}{\gamma}$ est égal à 1,66 environ.

251. **Pendules non compensés.** — Quel que soit le soin avec lequel on construise les pendules compensateurs, ils présentent, dans la pratique, un certain nombre d'inconvénients sur lesquels nous ne pouvons insister ici. Dans les horloges sur la précision desquelles on a besoin de

compter, on préfère souvent remplacer les pendules compensateurs par d'autres pendules, incomparablement plus simples et moins sujets à se déranger, dont la tige est en *bois de sapin verni*. Une semblable tige n'éprouve, par les changements de température et d'humidité de l'air, que des variations de longueur tout à fait insensibles.

* 252. **Thermomètre de Breguet.** — Soit deux lames de métaux différents, de zinc et de cuivre par exemple, appliquées l'une sur l'autre et soudées ensemble. Si l'on vient à chauffer ce système, le zinc s'allongeant beaucoup plus que le cuivre, la double lame se courbe, de manière que le zinc soit à l'extérieur et le cuivre à l'intérieur de la concavité. Si le système a reçu d'avance une certaine courbure, une élévation ou un abaissement de température tendent à l'accroître ou à la diminuer.

C'est sur ces remarques que Breguet a fondé la construction d'un thermomètre métallique d'une extrême sensibilité (*fig.* 206). Trois petites lames, d'argent, d'or et de platine ayant été superposées dans l'ordre où nous venons de les nommer et soudées ensemble, on les a passées au laminoir pour en faire un ruban aussi mince que possible. On a enroulé ce ruban en hélice ; on l'a suspendu par l'une de ses extrémités A, et l'on a attaché à l'autre extrémité B une aiguille très-légère *cd*, qui peut se mouvoir sur un cercle divisé MN. Supposons le métal le plus dilatable, l'argent, placé à l'extérieur. Si la température s'élève, chaque portion de spire de l'hélice tend à se courber davantage ; l'aiguille marche dans le sens de ce mouvement, en parcourant un angle égal à la somme des déplacements élémentaires de tous les points de l'hélice, estimés parallèlement au plan du cercle gradué. Si la température s'abaisse, l'aiguille marche en sens contraire. — Cet appareil se met rapidement en équilibre de température avec l'air environnant ; il accuse les moindres changements, par des écarts très-marqués de l'aiguille. On le gradue par comparaison avec un thermomètre à mercure.

Fig. 206. — Thermomètre métallique de Breguet.

II. — APPLICATIONS DES DILATATIONS DES LIQUIDES.

253. Réduction des hauteurs barométriques à la température 0°. — Nous avons établi (122), en traitant du baromètre, que, dans

la mesure des pressions atmosphériques, on peut substituer la comparaison des hauteurs des colonnes barométriques à celle de leurs poids. Or le raisonnement que nous avons fait supposait la densité du mercure constante dans toutes les observations ; en réalité, cette densité change avec la température. On est convenu, pour rendre les résultats comparables entre eux, d'énoncer toujours, non pas la hauteur barométrique observée, mais *la hauteur d'une colonne de mercure à 0° qui exercerait la même pression*. — Proposons-nous donc de *ramener à* 0° une hauteur barométrique H, observée à une température de t degrés (*).

Et d'abord, on a observé la hauteur H sur une échelle de laiton, qui est supposée graduée à 0° ; la hauteur réelle de la colonne barométrique est donc (247)

$$H' = H(1 + \gamma t).$$

γ étant le coefficient de dilatation linéaire du laiton.

Désignons maintenant par H_0 la hauteur de la colonne de mercure à 0° qui exercerait la même pression, par d et d_0 les densités du mercure à t degrés et à 0°. La pression de la colonne H' à t degrés, sur une surface s, est $sH'd$; la pression de la colonne H_0 à 0°, sur la même surface, est sH_0d_0 : pour que ces pressions soient égales, il suffit que l'on ait $H'd = H_0d_0$, d'où l'on tire :

$$\frac{H_0}{H'} = \frac{d}{d_0}.$$

Mais les densités d et d_0 du mercure sont, comme on l'a vu dans une question précédente (225), inversement proportionnelles aux binômes de dilatation $1 + \alpha t$ et 1, aux températures 1 et 0. Donc :

$$\frac{d}{d_0} \text{ ou } \frac{H_0}{H'} = \frac{1}{1+\alpha t}$$

ou enfin :

$$H_0 = H' \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

La correction relative à la dilatation du mercure consiste donc à diviser la hauteur barométrique réelle H' par le binôme de dilatation du mercure, relatif à la température de l'expérience. — Si l'on remplace H' par sa valeur, on trouve finalement, pour la hauteur barométrique corrigée,

$$H_0 = H \frac{1 + \gamma t}{1 + \alpha t}.$$

(*) Pour connaître avec précision la température de la colonne de mercure, on emploie un thermomètre à mercure dont le réservoir a un diamètre semblable à celui du tube barométrique, et qui est appliqué, soit sur la planche qui le supporte (*fig.* 108), soit sur la gaine qui l'environne (*fig.* 105).

254. **Corrections des volumes.** — En indiquant (92) la marche à suivre pour déterminer le volume d'un corps solide, par le poids de l'eau qu'il déplace, nous avons fait concevoir la nécessité d'une correction, pour le cas où l'opération n'aurait pas été faite à la température de 4°. Supposons qu'en plongeant un corps dans une masse d'eau à la température de t degrés, on ait trouvé p grammes pour le poids du liquide déplacé. Désignons par d la densité de l'eau à t degrés; le volume du liquide déplacé sera (101) :

$$v_0 = \frac{p}{d},$$

c'est aussi le volume du corps à la même température. Donc, pour obtenir en centimètres cubes le volume du corps à la température t de l'expérience, on devra prendre, non pas le nombre même qui exprime le poids de l'eau déplacée, mais le quotient de ce nombre par la densité de l'eau à cette même température. (Voir le tableau de la page 190.)

Le volume v_0 du corps à la température de 0° s'obtiendra par la formule :

$$v_0 = \frac{p}{D}\frac{1}{1+kt},$$

k désignant le coefficient de dilatation cubique du corps.

255. **Application du thermomètre à poids à la détermination des températures.** — Dulong et Petit ont fréquemment employé comme thermomètre destiné à la détermination des températures, l'appareil dont ils avaient fait usage dans la recherche des dilatations des liquides (*fig.* 195) : de là le nom de *thermomètre à poids*, qu'ils lui ont donné.

Supposons qu'après avoir empli de mercure cet appareil, à la température de 0°, on le porte dans une enceinte ou dans un bain liquide dont on se propose de déterminer la température T. On exécutera les mêmes manipulations que dans la recherche de la dilatation d'une enveloppe de verre (228) et on arrivera à l'équation

$$(P - \pi)(\alpha - k)T = p(1 + \alpha T),$$

d'où l'on tirera la valeur de T, savoir,

$$T = \frac{p}{(P - \pi(\alpha - k) - p\alpha}\ ;$$

p est la seule quantité variable d'une expérience à une autre : elle est donnée par l'expérience elle-même, et toutes les autres quantités sont antérieurement connues.

III. — APPLICATIONS DES DILATATIONS DES GAZ.

256. **Thermomètres à air en général.** — Tout appareil propre à la détermination du coefficient moyen de dilatation de l'air, entre 0° et une température connue T, peut servir comme thermomètre, pour déterminer les températures inférieures à T, quand on connaît le coefficient de dilatation.

Le thermomètre à air le plus simple serait donc l'appareil de Gay-Lussac (243). On observerait les nombres de divisions V_0 et V que le gaz occupe à 0° et à la température inconnue T : on calculerait ensuite la température en résolvant par rapport à T l'équation fournie par l'expérience.

Mais cet appareil présenterait les mêmes inconvénients que dans l'étude des dilatations des gaz : on a dû recourir à des instruments un peu plus compliqués, mais bien plus exacts.

* 257. **Pyromètre à air.** — L'appareil de M. Regnault (244) réunit toutes les conditions désirables d'exactitude. On lui conserve ordinairement la forme sous laquelle nous l'avons représenté; quelquefois cependant, il est plus avantageux de remplacer le ballon sphérique qui contient l'air, par un réservoir cylindrique allongé. La manipulation est d'ailleurs identiquement celle que nous avons décrite en traitant de la dilatation des gaz : elle conduit à la même équation, où l'on prend pour inconnue la température T, et l'on remplace le coefficient α par sa valeur numérique 0,00367.

Cet appareil, sauf quelques modifications de détail, avait été employé antérieurement déjà par Pouillet, dans des recherches sur les températures élevées. Pour en faire un *pyromètre à air*, il suffit de remplacer le réservoir de verre par un réservoir de platine.—C'est par ce moyen que Pouillet a pu évaluer, en degrés centigrades, les températures correspondantes aux couleurs que prennent successivement les métaux exposés à l'action du feu, savoir :

Rouge naissant.	525° C.
Rouge sombre.	700°
Cerise.	900.
Orangé foncé.	1100°
Blanc	1300°
Blanc éblouissant.	1500°

* 258. **Thermomètre à air de Dulong et Petit.**—On donne souvent au thermomètre à air une disposition plus simple, indiquée par Dulong et Petit ; la manipulation en a été perfectionnée par M. Regnault.

Un réservoir de verre, ayant à peu près les dimensions et la forme d'un thermomètre à poids, est porté dans l'enceinte ou dans le bain dont on veut déterminer la température T. Après qu'il y a séjourné pendant un temps suffisant, on ferme au chalumeau la pointe effilée du tube capillaire, et l'on note la pression atmosphérique H.

On retire l'appareil, on le laisse refroidir; puis on le place dans une position renversée sur le support *hg* (*fig.* 207), la pointe fermée *t* plongeant dans une cuvette à mercure, comme l'indique la figure. On entoure le réservoir *ab* de glace fondante, et quand l'équilibre de température est établi, on brise la pointe sous le mercure, à l'aide d'une pince; la force élastique du gaz ayant diminué par le refroidissement, le liquide s'élève dans le tube capillaire et jusque dans le réservoir. L'ascension étant terminée, on ferme de nouveau la pointe, ce qui s'exécute facilement en faisant mouvoir, le long de la tige horizontale *s*, la petite cuiller de fer *u* qui contient de la cire molle, jusqu'à ce que la pointe de verre s'y enfonce. On note la pression atmosphérique H′, on enlève la glace et on laisse l'appareil reprendre la température de l'atmosphère. On mesure alors la hauteur *h* de la colonne mercurielle qui est restée soulevée (*). — On enlève ensuite l'appareil de son support, avec le mercure qui y a pénétré, et on le pèse : soit P′ son poids. On l'emplit complétement de mercure, à 0°, et on le pèse de nouveau ; soit P le poids trouvé. Enfin, on fait sortir tout le mercure et l'on détermine le poids *p* de l'enveloppe seule.

Fig. 207. — Thermomètre à air.

Nous allons évaluer les volumes occupés successivement par l'air, à chacun des deux instants où l'on a fermé l'appareil. Au moment de la première fermeture, le volume de l'air à T degrés était égal au volume total de l'enveloppe, c'est-à-dire $\frac{P-p}{D_0}(1+kT)$, D_0 étant le poids spécifique du mercure à 0°, et *k* étant le coefficient de dilatation cubique du verre; la pression était H. — Au moment de la seconde fermeture, le volume de cette même masse d'air était $\frac{P-P'}{D_0}$ et la pression était H′—*h*.—Ramenons chacun de ces volumes à 0° et à la pression de 760 millimètres (242) et égalons les deux expressions : on aura ainsi :

$$\frac{P-p}{D_0}\cdot\frac{H}{760}\cdot\frac{1+kT}{1+\alpha T}=\frac{P-P'}{D_0}\cdot\frac{H'-h}{760},$$

équation d'où l'on tirera la valeur de l'inconnue T.

(*) On se sert pour cela du cathétomètre et de la vis à deux pointes *ik*, comme dans l'observation du baromètre fixe (128).

* 259 **Conversion des degrés du thermomètre à mercure en degrés du thermomètre à air.**— Comme application du thermomètre à air, nous indiquerons ici quelques-uns des résultats obtenus par M. Regnault en comparant cet instrument à deux thermomètres à mercure, l'un en cristal, l'autre en verre ordinaire. — Les nombres suivants, bien qu'ils ne s'appliquent rigoureusement qu'aux instruments étudiés par M. Regnault, peuvent servir, dans la plupart des cas, à convertir en degrés du thermomètre à air les degrés marqués par les thermomètres à mercure, avec une approximation suffisante.

TEMPÉRATURES du THERMOMÈTRE A AIR	TEMPÉRATURES DU THERMOMÈTRE A MERCURE	
	En cristal.	En verre.
100	100,00	100,00
140	140,29	139,85
180	180,80	179,63
220	221,82	219,80
260	263,44	260,20
300	305,72	301,08
350	360,50	354,00

260. **Corrections à faire subir aux résultats fournis par la méthode du flacon, pour déterminer les densités des corps solides et liquides à la température de 0°.** — Le poids spécifique d'un corps solide ou liquide est variable, comme l'est son volume, avec la température ; de là résulte que les tables de poids spécifiques, pour présenter des nombres comparables entre eux, doivent avoir été calculées en évaluant les poids spécifiques de tous les corps *à la même température*, — On a fait choix de la température 0° : c'est donc, pour chaque corps, le *poids de l'unité de volume du corps à* 0° qu'il s'agit de déterminer.

Or la détermination du volume peut s'effectuer en employant de l'eau à une température quelconque, pourvu qu'on fasse subir au résultat une correction que nous savons calculer (254); mais encore faut-il connaître avec exactitude cette température, et, si l'on se contentait d'employer l'eau à la température du laboratoire, il resterait toujours une certaine incertitude sur son degré de constance pendant l'expérience elle-même. M. Regnault a proposé d'effectuer toutes les déterminations avec l'eau à la température de la glace fondante, température facile à obtenir surtout pour de *petites quantités* d'eau. Aussi, est-ce au procédé du flacon que l'on doit avoir recours, de préférence à tout autre ; et c'est pour ce procédé spécialement que nous indiquerons le mode de calcul qui fournit la valeur des corrections.

M. Regnault emploie, pour les corps solides, de petits flacons qui ont la forme représentée par la figure 208. Dans le goulot, qui est assez large pour permettre d'y introduire les corps solides en fragments, s'engage

une sorte de bouchon creux, formé de deux portions de tube réunies par un tube capillaire : sur celui-ci est tracé un trait d'affleurement *a*. — Le flacon débouché ayant été rempli d'eau, on introduit le bouchon qui, déplaçant un peu de liquide, fait monter le niveau jusque dans l'entonnoir supérieur B. On place alors le petit flacon dans la glace fondante, et on l'y laisse séjourner au moins un quart d'heure; on enlève, avec un petit rouleau de papier buvard, le liquide qui dépasse le trait *a*, et l'on retire ensuite le flacon de la glace. Il n'est pas possible de le peser immédiatement ; car, lors même qu'on l'aurait essuyé avec soin, on aurait à craindre l'influence de l'eau qui se condenserait à sa surface pendant la pesée. On le laisse donc reprendre peu à peu la température du laboratoire, et, alors seulement, on l'essuie et on le porte sur le plateau de la balance, en plaçant à côté de lui le corps soumis à l'expérience, comme il a été dit (104). On fait la tare, et on détermine le poids du corps. On prend exactement la même série de précautions pour déterminer le poids du volume d'eau à 0° qui est égal à celui du corps; c'est-à-dire qu'on introduit le corps dans le flacon, on replace le bouchon, on remet le flacon dans la glace, et on rétablit l'affleurement au trait *a*. On retire ensuite le flacon, on le laisse reprendre la température du laboratoire, et on détermine les poids qu'il faut ajouter pour faire équilibre à la tare précédente.

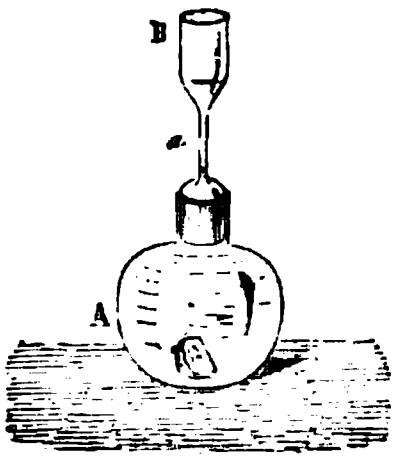


Fig. 208.

La même méthode s'applique aux corps liquides, en employant les flacons à réservoirs cylindriques ou sphériques (*fig.* 209 et 210) qui ont déjà été décrits précédemment (104). — L'affleurement au trait *a* est établi, soit pour le liquide soumis à l'expérience, soit pour l'eau, pendant que le flacon est à la température de la glace fondante ; mais les pesées ne se font qu'après que le flacon a repris la température du laboratoire.

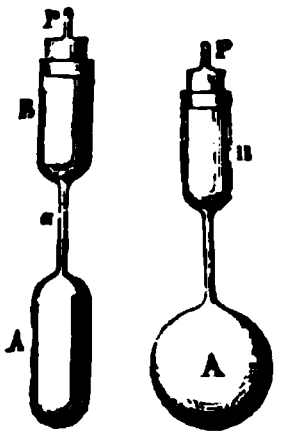


Fig. 209. Fig. 210.

Pour déduire des données de l'expérience, pour un corps solide par exemple, la densité de ce corps à 0°, on peut effectuer le calcul comme il suit :

Soit P le nombre de poids marqués que l'on a dû substituer au corps dans le plateau de la balance ; nous allons exprimer d'abord que ces poids, placés dans l'air, ont produit sur le plateau de la balance la même pression que le corps solide, celui-ci étant également placé dans l'air. — Le nombre P exprime la valeur des poids marqués *dans le vide;* par suite, la pression que ces poids exercent sur la balance est égale au nombre P diminué de la poussée exercée par l'air. Or, si Δ est la densité du métal dont sont faits ces poids, leur volume est $\frac{P}{\Delta}$, et, en désignant par a la densité de l'air par rapport à

l'eau, c'est-à-dire le poids en grammes du centimètre cube d'air dans les conditions de l'expérience, la poussée éprouvée par les poids marqués est $\frac{P}{\Delta} a$; donc, en définitive la pression exercée par les poids marqués sur le plateau est $P\left(1-\frac{a}{\Delta}\right)$. D'autre part, si V_0 est le volume du corps à 0°, k son coefficient de dilatation, et D_0 sa densité à 0°, c'est-à-dire le poids de l'unité de volume à 0°, la pression exercée par le corps sur le plateau est $V_0D_0 - V_0(1+kt)a$. La première lecture de poids conduit donc à l'équation

$$(1) \qquad P\left(1-\frac{a}{\Delta}\right) = V_0D_0 - V_0(1+kt)a.$$

Soit maintenant p le nombre de poids marqués que l'on a dû placer dans le plateau, après qu'on y a remis le flacon contenant le corps. Puisque la tare, mise dans l'autre plateau, est toujours restée la même, nous allons exprimer que ces poids, placés dans l'air, produisent la même pression sur la balance que le poids d'un volume d'eau à 0° égal à celui du corps, ce poids étant d'ailleurs diminué de la valeur de la poussée de l'air sur le corps. — Or la pression exercée par les poids marqués est $p\left(1-\frac{a}{\Delta}\right)$. Si maintenant on désigne par e_0 la densité de l'eau à 0°, le poids du volume d'eau égal à celui du corps est V_0e_0 : la poussée produite par l'air sur le corps est $V_0(1+kt)a$; en sorte que la seconde lecture de poids fournit l'équation

$$(2) \qquad p\left(1-\frac{a}{\Delta}\right) = V_0e_0 - V_0(1+kt)\,a.$$

En divisant l'équation (1) par l'équation (2), membre à membre, il vient :

$$\frac{P}{p} = \frac{D_0 - (1+kt)\,a}{e_0 - (1+kt)\,a};$$

d'où l'on tire la valeur de l'inconnue D_0, que l'on peut écrire

$$D_0 = \frac{P}{p}e_0 - \frac{P-p}{p}(1+kt)\,a\ (*).$$

(*) Les quantités qui entrent dans cette formule sont connues toutes avec exactitude. — La densité e_0 est égale à 0,999873 (tableau de la page 190). Le coefficient de dilatation k est connu. Enfin, quant au poids a du centimètre cube d'air dans les conditions de l'expérience, comme on sait que le poids d'un centimètre cube d'air sec à 0° et 760^{mm} est 0^{gr},001293, on aura, si l'air est également supposé sec au moment de l'expérience

$$a = 0^{gr},001293.\frac{H}{760}.\frac{1}{1+0,00367\,t},$$

H et t désignant la pression et la température actuelles. — Si l'on voulait tenir compte de l'humidité contenue dans l'atmosphère, il serait toujours facile de le faire, comme on l'indiquera plus loin.

Remarque.—Au lieu de la valeur exacte de D_0 que nous venons d'obtenir, on peut, dans la plupart des circonstances, employer une expression plus simple. Ainsi, le produit kt étant le plus souvent négligeable par rapport à l'unité, on peut se borner à la valeur approchée

$$D_0 = \frac{P}{p} e_0 - \frac{P - p}{p} a ,$$

dans laquelle on néglige simplement, comme on le voit, l'influence de la dilatation du corps entre 0° et t sur l'*accroissement* de la poussée exercée par l'air. A plus forte raison, si l'on voulait conserver le terme kt, pourrait-on se contenter d'une valeur approchée du coefficient de dilatation k du corps soumis à l'expérience.

On voit enfin que, si l'on ne tenait pas compte de la poussée de l'air, ni de ce que la densité de l'eau à 0° est différente de la densité à 4°, il suffirait de faire $a = o$ et $e_0 = 1$, ce qui donnerait la formule précédemment trouvée :

$$D_0 = \frac{P}{p}.$$

CHAPITRE IV

DENSITÉS DES GAZ

261. **Définitions.** — D'après la définition générale des poids spécifiques des corps (98), *le poids spécifique d'un gaz, dans des conditions déterminées de température et de pression, est le poids de l'unité de volume de ce gaz, pris dans les conditions énoncées.* On l'obtiendrait en divisant le poids d'un certain volume du gaz par le poids d'un égal volume d'eau. — Mais les nombres qui expriment les poids spécifiques des gaz par rapport à l'eau étant toujours très-petits, on a trouvé préférable d'introduire, dans les calculs, leurs rapports au poids spécifique de l'air.

Dès lors, pour les gaz, on appelle *densité par rapport à l'air* ou simplement *densité*, *le rapport entre les poids de volume égaux de ce gaz et d'air, pris dans des conditions identiques de température et de pression.*

262. La définition précédente suppose implicitement que le rapport des poids de volumes égaux de gaz et d'air demeure constant, quelles que soient la température et la pression, pourvu qu'elles soient les mêmes pour l'un et pour l'autre. Il en est ainsi lorsque le gaz suit, comme l'air, très-sensiblement la loi de Mariotte, et qu'il a le même coefficient de dilatation que l'air; car lors des volumes primitivement égaux des deux fluides éprouvent des variations égales sous l'influence des mêmes changements de température et de pression.

Mais les gaz s'écartent d'autant plus de la loi de Mariotte et ont un coefficient de dilatation d'autant plus différent de celui de l'air, qu'ils sont plus voisins de leur point de liquéfaction (140 et 246). Le rapport entre les poids de deux volumes égaux d'un gaz déterminé et d'air, pris l'un et l'autre dans des conditions identiques, peut donc varier avec ces conditions elles-mêmes. Il en résulte que, pour définir avec précision les densités des gaz par rapport à l'air, il faut convenir d'une température et d'une pression normales, auxquelles on les rapportera tous. C'est la température de 0° et la pression de 760 millimètres que l'on a choisies.

Nous adopterons donc la définition suivante, plus précise que la première :

On appelle densité d'un gaz par rapport à l'air ou simplement *densité, le rapport entre les poids de volumes égaux du gaz et d'air, pris l'un et l'autre à 0° et sous la pression de 760 millimètres.*

265. Détermination des densités des gaz : méthode de M. Regnault. — La méthode employée par M. Regnault consiste essentiellement :

1° A déterminer le poids du gaz proposé qui remplit à 0° et sous une pression connue, voisine de 760 millimètres, la capacité d'un ballon de verre d'une dizaine de litres environ ; on en conclut, au moyen de la loi de Mariotte, applicable quand il ne s'agit que de faibles variations de pression, le poids du gaz qui remplirait le ballon sous la pression normale et à 0° ;

2° A déterminer, en suivant une marche analogue, le poids d'un égal volume d'air dans les mêmes conditions.

Pour obtenir le nombre qui exprime la densité du gaz, il suffit de diviser le premier résultat par le second.

Le ballon A (*fig.* 211) qui sert aux expériences est fermé à la partie supérieure par une monture à robinet R ; au-dessus, se visse un raccord muni lui-même d'un robinet à trois voies R′, qui permet de faire communiquer le ballon, soit avec le tube latéral T, soit avec le tube supérieur S. — Le premier tube T vient s'adapter à la partie supérieure d'un *manomètre barométrique* ; on désigne ainsi un tube de verre C, plongeant dans une cuvette de mercure, laquelle reçoit aussi un tube barométrique B, parallèle au premier (*).

Fig. 211.

On commence par emplir le ballon du gaz proposé, à la température de 0° et sous la pression actuelle de l'atmosphère. — A cet effet, on entoure le ballon de glace fondante, on le met en communication par le tube S avec la machine pneumatique, et l'on y fait le vide aussi complé-

(*) On évalue la hauteur barométrique, au moment de l'expérience, au moyen d'une vis à deux pointes, comme nous l'avons dit pour le *baromètre fixe* (128) ; puis on mesure au cathétomètre la différence de hauteur des deux colonnes, ce qui permet de calculer la pression du gaz dans le ballon.

tement que possible: on change ensuite les communications de manière à faire arriver, par ce même tube S, du gaz préparé à l'avance dans un réservoir; on a soin d'ailleurs de faire toujours passer ce gaz, avant qu'il arrive au ballon, dans une série de tubes qui contiennent des substances propres à le dessécher et à le purifier. Pour être certain que le ballon ne contient plus que du gaz sans mélange d'air, on recommence cinq ou six fois la même série de manipulations. Enfin, après la dernière rentrée du gaz, on laisse pendant quelques instants l'intérieur du ballon en communication avec l'atmosphère, par l'intermédiaire des tubes desséchants. On note la pression barométrique H, on ferme le robinet R et l'on sépare le raccord R′. — On retire alors le ballon de la glace, et l'on attend qu'il ait pris la température du laboratoire; après quoi, on l'essuie, on le suspend sous l'un des plateaux d'une bonne balance et l'on en fait la tare.

Il est clair que, si l'on pouvait alors extraire complétement le gaz du ballon, la perte de poids qu'il aurait éprouvée donnerait le poids de gaz qui remplit le ballon à 0° et sous la pression H. Mais on sait que les meilleures machines pneumatiques ne peuvent faire un vide absolu : on a recours alors à un procédé qui conduit, en définitive, à un résultat équivalent. — On replace le ballon dans la glace, et au moyen du raccord R′, on le remet en communication avec le manomètre et avec la machine pneumatique. On fait le vide aussi complétement que possible; puis on lit, sur le manomètre barométrique, la tension s du gaz qui reste dans le ballon; on ferme enfin le robinet R, on détache le raccord, on replace le ballon sous le plateau de la balance, après avoir pris les mêmes précautions que pour la première pesée, et l'on rétablit l'équilibre avec des poids marqués. Or la somme des poids p qu'il faut ajouter ainsi du côté du ballon exprime, avec l'exactitude de la double pesée, le poids de gaz enlevé par la machine; la pression dans le ballon ayant diminué de la quantité $H - s$, il est clair que p est le poids de gaz qui occuperait le volume du ballon sous la pression $H - s$ et à la température de 0° (148); on en déduit immédiatement, par la loi de Mariotte, le poids P du même gaz qui remplirait le même volume à 0° et sous la pression normale de 760 millimètres, savoir :

$$(1) \qquad P = p\,\frac{760}{H - s}.$$

On répète ensuite sur l'air la même série d'expériences; soit P′, p', H′, s' les quantités correspondantes à P, p, H, s, dans ces nouvelles déterminations; le poids P′ de l'air qui emplirait le ballon à 0°, et sous la pression de 760 millimètres, est donné par la formule

$$(2) \qquad P' = p'\,\frac{760}{H' - s'}.$$

En divisant membre à membre les égalités (1) et (2), et observant que le

quotient $\frac{P}{P'}$, est précisément la densité cherchée d_0, on a :

$$d_0 = \frac{p}{p'} \times \frac{H' - \varepsilon'}{H - \varepsilon}.$$

264. Emploi des tares compensées, dans la méthode précédente, pour éviter les corrections relatives à la poussée de l'air. — Il est une circonstance dont nous n'avons tenu aucun compte, dans le calcul qui précède, c'est la poussée qu'éprouve le ballon de la part de l'air environnant. — Revenons aux opérations qui ont donné le poids p du gaz sorti. Si, lors des deux pesées du ballon plein de gaz et du ballon vide, l'air extérieur se trouve dans des conditions identiques de température, de pression et d'humidité, la poussée qu'il exerce est évidemment la même dans les deux cas, et le poids p est bien celui du gaz enlevé par la machine pneumatique. Mais, si les conditions atmosphériques ont changé d'une pesée à l'autre, si le poids de l'air déplacé par le ballon a augmenté ou diminué d'une certaine quantité, le poids p qu'il a fallu pour rétablir l'équilibre est celui du gaz extrait par la machine pneumatique, augmenté ou diminué de cette même quantité. — Les mêmes remarques sont applicables au poids p'.

Les physiciens qui, avant M. Regnault, s'étaient occupés de la recherche des densités des gaz, MM. Biot et Arago d'abord, MM. Dumas et Boussingault ensuite, avaient cherché à déterminer aussi exactement que possible la perte de poids du ballon, dans chacune des quatre pesées, afin d'en tenir compte dans le calcul des expériences. Mais ce genre de corrections présente beaucoup d'incertitudes; il vaut mieux, ainsi que l'a fait M. Regnault, se placer dans des conditions telles qu'il n'y ait plus aucune correction à effectuer.

A cet effet, on établit la tare du ballon, non plus avec des corps quelconques, mais à l'aide d'un autre ballon A′ (*fig.* 212), fabriqué en même temps et avec le même verre, et présentant le même volume extérieur que celui qui sert aux expériences (*). On introduit dans ce ballon auxiliaire un peu de mercure, pour rendre son poids à peu près égal à celui du ballon A.

La cage de la balance repose sur une armoire vitrée; c'est dans l'atmosphère de cette armoire que flottent les deux ballons, suspendus aux

(*) Pour obtenir deux ballons de même volume extérieur, on commence par les choisir de volumes peu différents; on prend le plus grand des deux pour le ballon A qui doit recevoir le gaz; au plus petit A′ on adapte une simple virole métallique, terminée par un crochet. On les emplit d'eau et l'on détermine leurs volumes extérieurs par le procédé décrit (92). Supposons que l'on trouve, entre les volumes, une différence de 25 centimètres cubes ; pour achever la compensation, on façonne à la lampe un tube de verre fermé aux deux bouts, qui éprouve dans l'eau une perte de poids de 25 grammes : ce tube, étant suspendu à la virole du ballon A′, comme le représente la figure 212, forme évidemment avec lui un volume total égal à celui du ballon A.

plateaux par des fils qui traversent des ouvertures convenablement disposées. L'air de l'armoire est desséché par de la chaux vive. — Les deux ballons A et A′ ayant le même volume extérieur, les poussées qu'ils éprouvent sont et restent égales, quels que soient les changements qui peuvent survenir dans la température ou dans la pression de l'air environnant. Le ballon A se trouve donc dans les mêmes conditions que s'il était suspendu dans un espace vide, car la poussée qu'il éprouve est sans cesse équilibrée, sur la balance, par celle qu'éprouve le ballon A′.

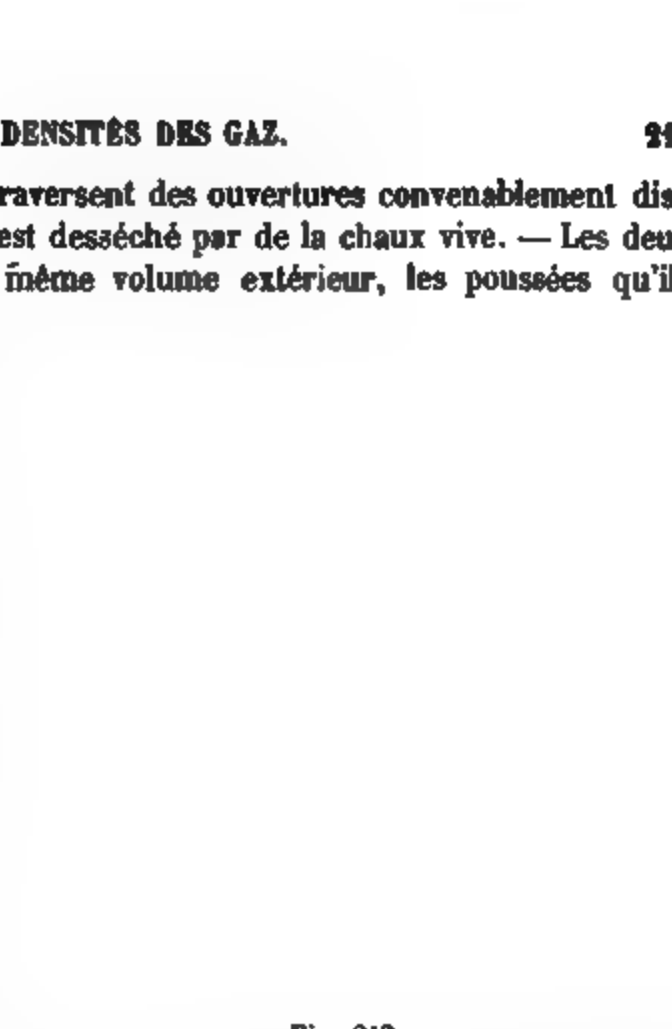


Fig. 212.

265. **Poids spécifiques des gaz par rapport à l'eau.** — Les densités des gaz étant connues *par rapport à l'air*, il suffit, pour obtenir leurs poids spécifiques *par rapport à l'eau*, c'est-à-dire les poids de l'unité de volume, de multiplier chacune de ces densités par le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau. C'est ce qu'on démontrerait en répétant le raisonnement qui a été fait pour les corps solides solubles dans l'eau, dont nous avons déterminé d'abord le poids spécifique par rapport à un autre liquide (106). — Nous devons donc chercher à obtenir maintenant le poids d'un volume connu d'air, d'un litre d'air par exemple, à la température de 0° et à la pression de 760 millimètres.

266. **Poids du litre d'air.** — Pour trouver le poids d'un litre d'air, dans les conditions normales de température et de pression, nous emploierons un ballon semblable au ballon A (*fig.* 211), et nous déterminerons :

1° Le poids P′ de l'air, à la température 0° et sous la pression de 760 millimètres, que contient ce ballon ; 2° son volume en litres, à la même température. Le quotient de P′ par le nombre de litres trouvé exprimera le poids cherché.

Le poids P′ ayant été déterminé par les expériences décrites plus haut (263), savoir :

$$P' = p' \frac{760}{H' - s'},$$

il reste seulement à mesurer la capacité du ballon. — On emplit entièrement le ballon, à la température de 0°, d'eau distillée purgée d'air par

ébullition. On le ferme, et après l'avoir bien essuyé, on le pèse à une température inférieure à 8° (cette dernière précaution est nécessaire pour éviter qu'il n'y ait rupture par suite de la dilatation de l'eau, à une température plus élevée). Le poids trouvé Q représente le poids de l'enveloppe, plus le poids M de l'eau qui remplit le ballon à 0°, moins le poids de l'air déplacé. — On vide ensuite le ballon, on le sèche, et on l'emplit d'air à 0°, sous la pression H′ du moment. On le ferme et on le pèse, dans des conditions de température et de pression extérieure identiques, autant que possible, à celles où la première pesée a eu lieu. Le nouveau poids obtenu Q′ représente le poids de l'enveloppe, plus le poids P_1 de l'air qui remplit le ballon à 0° et sous la pression H_1, moins le poids de l'air déplacé (*). — Par suite, la différence $Q-Q'$ est égale à l'excès $M-P_1$, en sorte que

$$M=Q-Q'+P_1.$$

Or P_1 se calcule aisément, car on connaît le poids P′ de l'air que le ballon contient à 0°, sous la pression de 760 millimètres, et l'on en déduit, d'après la loi de Mariotte:

$$P_1=P'\frac{H_1}{760};$$

On voit donc que, M étant entièrement connu, il suffira de diviser ce poids évalué en kilogrammes, par la densité de l'eau à 0°, savoir 0,999873, pour obtenir le volume du ballon en litres.

M. Regnault a reconnu, par cette méthode, qu'un litre d'air pris à 0° et sous la pression de 760 millimètres, pèse 1gr,293187.

267. **Calcul des poids spécifiques des gaz par rapport à l'eau.** — Pour obtenir le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau, il suffit d'exprimer le poids de l'unité de volume d'air en prenant pour unité de poids le poids de l'unité de volume d'eau (98, *Rem.*), Or nous venons de dire que 1 litre d'air à 0°, et sous la pression de 760 millimètres, pèse 1gr,293; puisque nous avons pris ici le litre pour unité de volume, nous devons prendre pour unité de poids le kilogramme, et nous aurons, pour la densité de l'air par rapport à l'eau, le nombre 0,001293. — Ce nombre exprime, en grammes, le poids de 1 centimètre cube d'air; en kilogrammes, le poids de 1 litre ou de 1 décimètre cube d'air; etc.

Le poids spécifique d'un gaz quelconque, par rapport à l'eau, évalué à 0°, et sous la pression de 760 millimètres, s'obtiendra en multipliant le nombre précédent par la densité du gaz rapportée à l'air. — Par exemple, le poids spécifique de l'acide carbonique rapporté à l'eau sera, dans les circonstances normales, $0,001293\times 1,5291$.

(*) Il est inutile, dans les pesées qui servent à obtenir Q et Q′, de se servir du ballon A′ pour établir la tare. Les variations, toujours très-faibles, que peut éprouver la poussée due à l'air environnant, sont tout à fait négligeables à côté du poids M que l'on se propose de trouver.

268. Calcul du poids d'un volume déterminé d'un gaz, dans des circonstances données de température et de pression. — Ce poids s'obtient en multipliant le poids spécifique du gaz par rapport à l'eau, dans les circonstances données, par le nombre qui exprime le volume donné (101).

Proposons-nous, par exemple, de trouver le poids de 5 litres d'acide carbonique à 10° et sous la pression de 750 millimètres. — La densité du gaz par rapport à l'eau étant $0{,}001293 \times 1{,}5291$ dans les circonstances normales, elle est, à 10° et sous la pression de 750^{mm},

$$0{,}001293 \times 1{,}5291 \times \frac{750}{760} \times \frac{1}{1+0{,}00367\times 10}; \quad (241, \textit{Rem.})$$

le poids cherché, exprimé en kilogrammes, est donc :

$$5 \times 0{,}001293 \times 1{,}5291 \times \frac{750}{760} \times \frac{1}{1+0{,}00367\times 10} = 0^{kil},0094066.$$

Lorsque le volume du gaz est donné en litres, on préfère quelquefois évaluer le poids en grammes. Il suffit, pour cela, de multiplier par 1000 le nombre 0,001293 qui exprime en kilogrammes le poids du litre d'air.

En *général*, le poids en grammes P d'un certain nombre V de litres d'un gaz, à t degrés et sous la pression H, est donné par la formule suivante, qui est d'un usage très-fréquent :

$$P = V \times 1^{gr},293 \times d \times \frac{H}{760} \times \frac{1}{1+\alpha t};$$

α désigne le coefficient de dilatation du gaz, et d sa densité, par rapport à l'air.

269. Détermination des densités des gaz qui attaquent les métaux. — La méthode que nous venons d'exposer ne peut s'appliquer aux gaz, tels que le chlore, qui attaquent les métaux à la température ordinaire; il faut alors substituer, aux ballons à garnitures métalliques, des vases entièrement en verre.

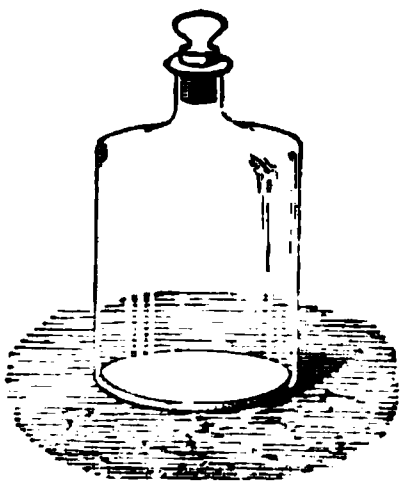


Fig. 213.

Le procédé le plus simple consiste à employer un flacon de verre, de 1 à 2 litres de capacité, (*fig.* 213), se fermant avec un bouchon usé à l'émeri. Ce flacon étant entouré de glace fondante, on l'emplit de chlore sec en suivant le procédé qu'on indique en Chimie : on replace le bouchon, et l'on note la pression H de l'atmosphère. On laisse reprendre au flacon la température du laboratoire, on l'essuie, et l'on en fait la tare au moyen d'un autre vase de même volume extérieur. — On le reporte ensuite dans la glace, et l'on chasse le chlore par un courant d'air sec : on le bouche de nouveau, et l'on note une seconde fois la pression H′. Le flacon étant replacé dans la

balance, on trouve qu'il a perdu de son poids, car l'air qu'il renferme maintenant est plus léger que le chlore; le poids M qu'il faut ajouter sur le même plateau, pour établir l'équilibre, exprime l'excès du poids P du chlore qui remplit le flacon à 0° sous la pression H, sur le poids P′ de l'air qui le remplit à la même température sous la pression H′.

Supposons connu le volume intérieur V_0 du flacon, exprimé en litres; P′ sera donné par la formule

$$P' = V_0 \times 1^{gr},293 \times \frac{H'}{760};$$

et par suite P ou M — P′ sera lui-même connu. On en déduira le poids du chlore, à la pression de 760 millimètres, que pourrait contenir le flacon, savoir :

$$P \times \frac{760}{H}$$

et en divisant ce résultat par $V_0 \times 1^{gr},293$, on aura la densité cherchée.

Pour obtenir le volume V_0, on détermine l'excès Q du poids du flacon plein d'eau à 0°, sur le poids de ce même flacon plein d'air à la même température et sous la pression H′; le poids de l'eau pouvant se représenter par $V_0 \times 999^{gr},873$ et celui de l'air par $V_0 \times 1^{gr},293 \times \frac{H'}{760}$, on aura évidemment :

$$Q = V_0\left(999^{gr},873 - 1^{gr},293 \times \frac{H'}{760}\right),$$

équation dont on déduira la valeur de V_0.

On retrouvera plus loin, dans la détermination des densités des vapeurs, la même série d'opérations et de calculs.

270. **Résultats.** — Nous réunissons, dans le tableau suivant, les densités d'un certain nombre de gaz, par rapport à l'air; la plupart ont été déterminées par M. Regnault.

NOMS DES GAZ	DENSITÉS à 0° et sous la pression de 760mm, par rapport à l'air.
Air	1,0000
Hydrogène	0,0693
Azote	0,9714
Oxygène	1,1056
Chlore	2,4216
Cyanogène	1,8064
Acide sulfureux	2,1930
Acide carbonique	1,5291
Oxyde de carbone	0,9569
Protoxyde d'azote	1,5269
Bioxyde d'azote	1,0388

CHAPITRE V

CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS

PASSAGE DE L'ÉTAT SOLIDE A L'ÉTAT LIQUIDE, ET PASSAGE INVERSE DE L'ÉTAT LIQUIDE A L'ÉTAT SOLIDE

271. **Des divers changements d'état des corps.** — Nous avons vu jusqu'ici la chaleur déterminer, dans les corps, des changements de volume. Dans d'autres circonstances, elle peut produire chez eux des *changements d'état*, ainsi que nous l'avons déjà indiqué succinctement (30).

Lorsqu'on porte un corps solide à des températures de plus en plus élevées, il arrive en général un moment où il passe à l'état liquide; on dit alors qu'il entre en *fusion*. — Réciproquement, si l'on refroidit suffisamment un liquide, il revient à l'état solide; c'est le phénomène de la *solidification*.

De même, sous l'influence de la chaleur, les liquides se changent en fluides aériformes; ils se *vaporisent*. — Inversement, les vapeurs reviennent à l'état liquide quand on les refroidit; c'est le phénomène connu sous le nom de *condensation* ou de *liquéfaction*.

272. **Lois de la fusion.** — La fusion d'un corps est soumise aux deux lois suivantes :

1° *Un même corps entre toujours en fusion à une même température, que l'on appelle son* point de fusion;

2° *Cette température une fois atteinte, la fusion du corps s'effectue d'une manière successive, sa température demeurant invariable pendant toute la durée du phénomène.*

Ces lois sont faciles à vérifier en mettant un corps thermométrique en contact avec le corps solide dont on étudie la fusion; la seule précaution à observer est d'employer une quantité suffisamment grande du corps soumis à l'expérience, pour que le liquide du thermomètre en soit partout enveloppé et se trouve ainsi protégé contre toute cause étrangère de réchauffement ou de refroidissement.

C'est la constance de la température de fusion de la glace que nous

avons utilisée pour la détermination du point fixe inférieur du thermomètre (204); avec cet instrument une fois gradué, on peut trouver, pour chaque corps, la température à laquelle la fusion commence. — On fera d'ailleurs usage de tel ou tel corps thermométrique, parmi ceux qui ont été précédemment indiqués, selon que la température à évaluer sera plus ou moins élevée.

273. **Point de fusion.** — Chaque substance a un point de fusion déterminé, qui constitue l'une de ses propriétés physiques les plus importantes. Ce point de fusion est d'ailleurs souvent un indice précieux de sa pureté, car la présence de matières étrangères, même en quantités très-petites, peut suffire pour faire varier de plusieurs degrés la température de la fusion. — Le tableau suivant renferme les points de fusion d'un certain nombre de corps solides, classés par ordre alphabétique.

NOMS DES CORPS.	POINTS de fusion.	NOMS DES CORPS.	POINTS de fusion.
Acier	1300 à 1400°	Iode	107
Antimoine	432	Mercure	— 40
Argent	1000	Or	1250
Bismuth	262	Phosphore	43
Blanc de baleine	49	Plomb	320
Cire blanche	68	Potassium	58
Étain	230	Sodium	90
Fer	1500 à 1600	Soufre	115
Fonte blanche	1050 à 1100	Suif	43
Fonte grise	1100 à 1200	Zinc	360
Glace	0°		

Certaines substances ont été considérées pendant longtemps comme *réfractaires*, c'est-à-dire comme infusibles; mais, à mesure que l'on est parvenu à produire des températures plus élevées, on a pu en diminuer successivement le nombre. — C'est ainsi que M. Gaudin a réussi à fondre le cristal de roche, à l'aide d'une lampe alimentée par un jet d'oxygène. Plus tard, Despretz, en combinant les effets calorifiques du soleil, de la pile et du chalumeau à gaz hydrogène et oxygène, a fondu l'alumine, la magnésie, et ramolli le charbon. En activant la flamme du gaz d'éclairage par un courant d'oxygène, et opérant dans un petit four en chaux vive, MM. H. Sainte-Claire Deville et Debray sont arrivés à obtenir à l'état de fluidité parfaite plusieurs kilogrammes de platine, métal que jusqu'alors on parvenait seulement à ramollir, quand il était en masse un peu considérable. — Tout porte donc à croire qu'avec des sources de chaleur suffisamment énergiques, on réussirait à fondre toutes les substances solides (*).

(*) Il est clair qu'il ne s'agit ici que des corps simples, ou des corps composés qui ne peuvent être décomposés par la chaleur. — Lorsque, parmi les éléments d'un corps composé, il en est qui peuvent prendre l'état gazeux, l'élévation de la température peut avoir pour effet de produire le phénomène qui a été désigné, par M. H. Sainte-Claire Deville, sous le nom de *dissociation*; c'est une séparation pure et simple des éléments du corps, c'est-à-dire un phénomène chimique.

274. **Chaleur latente de fusion.** — La température d'un corps demeurant invariable pendant tout le temps que dure sa fusion, quelle que soit l'activité du foyer de chaleur qui produit le phénomène, on en doit conclure que toute la chaleur fournie par le foyer est alors employée à produire le changement d'état : on désigne sous le nom de *chaleur latente de fusion* la chaleur qu'absorbe un corps solide, lorsqu'il passe à l'état liquide sans changer de température.

La comparaison des résultats fournis par deux expériences très-simples peut mettre en évidence cette absorption de chaleur par la fusion :

Lorsqu'on mêle ensemble 1 kilogr. d'*eau* à 0° et 1 kilogr. d'eau à 80°, le mélange prend la température de 40°. — Si l'on fait fondre 1 kilogr. de *glace* à 0° dans 1 kilogr. d'eau à 80°, on obtient définitivement 2 kilogr. d'eau à 0°. — Il en faut conclure que 1 kilogr. de glace exige pour se fondre, sans changer de température, toute la chaleur que peut abandonner 1 kilogr. d'eau en se refroidissant de 80° à 0°.

275. **Lois générales de la solidification.** — Le retour des liquides à l'état solide est régi, au moins dans la plupart des cas, par deux lois identiques à celles de la fusion :

1° *Un même liquide se solidifie en général à une température déterminée, qui est précisément celle de la fusion du solide dans lequel il se transforme ;*

2° *Cette température une fois atteinte, le liquide se solidifie peu à peu, sa température demeurant invariable pendant toute la durée du phénomène.*

La lenteur de la solidification résulte évidemment de ce que la chaleur qui était devenue latente au moment de la fusion doit être dégagée au moment où le corps se solidifie. Dès lors, quand une portion du liquide est passée à l'état solide, il faut que la chaleur dégagée par elle ait été transmise par le liquide aux corps environnants avant que la solidification puisse se poursuivre.

Quant à cette partie de la première loi, que la température à laquelle chaque corps se solidifie est précisément *celle qui constitue le point de fusion* de ce corps, nous donnerons plus loin quelques développements sur le sens précis qu'il convient de lui donner (278).

276. **Cristallisation par voie sèche.** — Lorsqu'un corps revient de l'état liquide à l'état solide, il manifeste en général une tendance à affecter des formes géométriques plus ou moins régulières, à *cristalliser*. Quand le changement d'état est produit simplement par une variation de température, sans l'intervention d'aucun liquide comme dissolvant, on dit que la cristallisation se fait *par voie sèche*.

Les expériences que l'on reproduit dans tous les cours de Chimie, et dans lesquelles on effectue la cristallisation du soufre et du bismuth par la voie sèche, montrent qu'un même corps, revenant de l'état liquide à l'état solide dans les mêmes circonstances, affecte toujours une même forme cristalline.

277. **Corps vitreux.** — Il est un certain nombre de corps qui, en passant de l'état liquide à l'état solide, ne peuvent affecter la forme cristalline; ce sont les corps qui, entre l'état de fluidité parfaite et l'état solide, présentent tous les intermédiaires de la viscosité : tels sont le phosphore, le verre, la cire. — On sait, en effet, que lorsqu'on chauffe du verre à la lampe d'émailleur, il commence par se ramollir en prenant l'état *pâteux* : puis, à mesure que la température s'élève, il devient de plus en plus fluide, et ce n'est qu'au rouge blanc, à la température du four des verriers, qu'il acquiert une liquidité à peu près comparable à celle de l'eau. Inversement, quand le verre fondu se refroidit, il revient à l'état solide en repassant, dans l'ordre inverse, par tous les degrés de consistance qu'il avait affectés en se fondant : cet épaississement progressif de la matière est un obstacle à ce que les molécules puissent se grouper conformément aux lois de la cristallisation.

On désigne sous le nom général d'*état vitreux* l'état particulier que présentent ces corps. — Ce n'est d'ailleurs qu'un état d'équilibre instable, car l'expérience montre que de pareils corps, lorsqu'on les abandonne à eux-mêmes, à une température qui ne soit pas trop inférieure à celle où la solidification a eu lieu, éprouvent la *dévitrification*, c'est-à-dire que la masse se convertit en une multitude de petits cristaux, orientés dans diverses directions : chez les corps où l'état vitreux est caractérisé par une transparence semblable à celle du verre, l'état dévitrifié est au contraire caractérisé par une opacité comparable à celle de la porcelaine. Le phosphore, l'acide arsénieux, l'acide borique présentent des exemples de ces transformations.

278. **Phénomènes de surfusion.** — Un grand nombre de corps liquides peuvent être amenés et maintenus à des températures bien inférieures au *point de fusion* du solide dans lequel ils se transformeraient, sans que la solidification se produise : ce phénomène, dont nous allons indiquer rapidement les conditions connues, a reçu le nom de *surfusion*.

Très-anciennement déjà, Fahrenheit et Blagden avaient montré que de l'eau contenue dans des tubes de petit diamètre, bien purgés d'air et fermés, peut conserver l'état liquide jusqu'à la température de — 12°. Cette observation a été mise à profit par Desprez, pour étudier la dilatation de l'eau liquide aux températures inférieures à 0° (236) : on a même pu constater, dans ces expériences, que si l'eau a bouilli longtemps dans le tube où on l'enferme, sa température peut être abaissée jusqu'à — 20°, sans qu'il y ait congélation.

Une masse d'eau liquide, contenue dans un vase de dimensions ordinaires, peut encore être refroidie de quelques degrés au-dessous de 0°, sans se solidifier, pourvu qu'on ait soin de la maintenir dans un état d'immobilité parfaite : il est utile d'ailleurs, pour le succès de l'expérience, de couvrir d'une couche d'huile la surface du liquide. — De même,

le soufre, le phosphore peuvent, dans des conditions pareilles, présenter la surfusion à des températures quelquefois très-basses : ainsi, le phosphore, dont le point de fusion est à 44°,2, peut être amené, sous l'eau, jusqu'à la température ordinaire sans se solidifier.

Dans ces diverses expériences, si la solidification vient à se produire, elle affecte brusquement une portion considérable de la masse, et la *température remonte et se maintient à la température de fusion du corps.* — Cette particularité s'explique, si l'on remarque que les parties solidifiées abandonnent leur chaleur latente de fusion, laquelle sert à réchauffer la portion de la masse qui est restée liquide : la solidification porte donc immédiatement sur une quantité de substance telle que la quantité de chaleur latente dégagée par elle fasse remonter la température de la masse tout entière exactement au point de fusion. A partir de ce moment, si les corps environnants continuent d'enlever de la chaleur au liquide en question, la solidification se poursuit lentement, la température demeurant invariable. On voit donc que la première loi de la solidification (275) est exacte en ce sens que, *pendant que la solidification d'une masse liquide s'effectue, la température est et demeure égale à la température de fusion* : mais la solidification ne *commence* pas toujours à cette même température.

Quant aux causes qui peuvent *déterminer* la solidification, l'expérience montre que les tubes contenant l'eau refroidie à —12° peuvent être renversés sur eux-mêmes sans qu'il y ait congélation; et il semble, en général, que les ébranlements excités dans les liquides surfondus soient incapables de déterminer la solidification. Au contraire, le frottement de deux corps solides l'un contre l'autre produit souvent le phénomène.

Enfin, un moyen infaillible de déterminer la cristallisation d'un liquide surfondu consiste à y projeter une parcelle d'un cristal de ce même corps, ou d'un corps isomorphe. Cette condition, que le cristal soit identique à ceux qui peuvent se produire dans le liquide, ou tout au moins isomorphe, est nécessaire pour que sa présence soit efficace : c'est ce qui a été démontré par M. Gernez, à l'aide d'expériences très-variées. — Par exemple, du soufre fondu et couvert d'une solution saturée de chlorure de calcium peut être amené à 10 degrés au-dessous de son point de fusion, sans se solidifier. Si l'on projette dans le liquide un cristal de soufre *octaédrique*, il ne détermine pas la cristallisation : on sait, en effet, que les cristaux qui se formeraient à cette température seraient prismatiques. Si maintenant on laisse tomber dans le même liquide un cristal de soufre *prismatique*, il se produit autour de lui une cristallisation rapide.

279. **Expériences de M. Dufour.** — M. L. Dufour, de Lausanne, a pu produire encore la surfusion dans des conditions assez différentes de celles qui précèdent. Le liquide soumis à l'expérience est placé, en gouttelettes, au sein d'un liquide non miscible avec lui, et ayant son point de fusion à une température bien inférieure : on peut alors observer les

gouttelettes surfondues dans une étendue très-grande de l'échelle thermométrique. — Ainsi, dans un bain de chloroforme et d'huile d'amandes douces, des gouttes d'eau en suspension peuvent être refroidies à $-20°$, sans se solidifier. Dans une solution de chlorure de zinc, des gouttes de soufre ou de phosphore ont pu être amenées à des températures très-inférieures à 0°, etc.

Dans ces expériences, la solidification se produit immédiatement si l'on vient toucher les gouttes liquides avec un fragment solide du même corps; suivant M. Dufour, le contact d'un autre corps solide peut encore parfois déterminer le phénomène, mais d'une manière moins sûre.

Ce mode de surfusion de l'eau peut jouer, dans les phénomènes atmosphériques, un rôle sur lequel nous aurons à revenir en Météorologie.

280. **Changements de volume qui accompagnent la fusion.** — La plupart des corps éprouvent, au moment où ils passent de l'état solide à l'état liquide, sans changer de température, un accroissement de volume : on constate en effet que le soufre, la cire, les métaux restent au fond du liquide dans lequel il se transforment. — Inversement, la solidification de ces corps est accompagnée d'une contraction.

Un petit nombre de corps éprouvent, au contraire, en passant de l'état solide à l'état liquide, une diminution de volume. L'eau fournit un exemple d'une exception de ce genre : chacun peut observer, en effet, qu'en hiver les glaçons des rivières et des lacs surnagent : la densité de la glace est donc moindre que celle de l'eau. L'expérience directe a d'ailleurs prouvé qu'à 0°, la densité de la glace est environ 0,92. — De ce fait il résulte que l'eau, en se congelant, éprouve un accroissement de volume, et l'expérience montre que cet accroissement peut donner lieu, dans certains cas, à des effets mécaniques très-intenses. Huyghens a constaté qu'un canon de fusil rempli d'eau, et exactement fermé, se déchire lorsque le liquide intérieur se congèle.

Les pierres dites *gélives* ne sont autre chose que des calcaires très-poreux qui, s'imprégnant d'eau pendant la saison des pluies, se fendent dans tous les sens lorsque les froids de l'hiver déterminent la solidification du liquide. — Cette force d'expansion, que l'eau développe au moment de sa congélation, joue dans la désagrégation des roches, à la surface du globe, un rôle très-important.

* 281. **Influence de la pression sur la température de fusion.** — Des expériences de M. W. Thomson et de M. Bunsen ont montré que des pressions très-énergiques peuvent modifier la température de fusion des corps. — Il résulte de ces expériences que, sous des pressions croissantes, la température de fusion s'abaisse un peu, pour les corps dont le volume diminue au moment du passage à l'état liquide. Tel est le cas de la glace, dont le point de fusion peut descendre jusqu'à $-0°,13$, sous une pression de 17 atmosphères environ. — Au contraire, pour les corps dont le volume augmente par le passage de l'état solide à l'état liquide,

un accroissement de pression élève la température de fusion. Tel est le cas du blanc de baleine, qui fond à 47°,7 sous la pression atmosphérique, et à 50°,9 sous une pression de 156 atmosphères.

Le retard qu'éprouve le point de fusion de la glace, sous l'influence d'une pression considérable, explique une expérience curieuse, due à M. Tyndall. — On prend de la glace pilée, et on en fait une sorte de pelote, que l'on comprime à l'aide d'une presse hydraulique, entre deux pièces de bois dur A, B (*fig.* 214) qui laissent entre elles une cavité de forme lenticulaire. La glace se brise d'abord en fragments plus petits; mais bientôt tous ces fragments se réunissent en une masse cohérente, et, *en quelques secondes*, on obtient une lentille transparente, exactement moulée sur la cavité où elle est placée. — M. Tyndall interprète ce résultat de la manière suivante. La glace ayant été comprimée, son point de fusion a dû s'abaisser un peu; une partie de cette glace a donc passé à l'état liquide, et, en même temps, il s'est produit un abaissement de température, dû à l'absorption de chaleur latente. Mais les parties de l'eau qui sont devenues liquides ont pu s'échapper par les fissures de la masse, en sorte que la pression supportée par l'ensemble a diminué : l'eau liquide et refroidie au-dessous de zéro a donc subi un *regel*, et a soudé entre eux tous les petits fragments de glace.

Fig. 214.

282. **Dissolution des corps solides dans les liquides.** — Lorsqu'on met un corps solide, comme le sucre ou le sel marin, en présence d'un liquide, comme l'eau, on voit le corps solide se transformer en un liquide qui se mélange intimement au premier. — Le passage de l'état solide à l'état liquide, lorsqu'il s'effectue dans ces circonstances particulières, prend le nom de *dissolution*.

La dissolution d'un corps solide dans un liquide est généralement accompagnée d'un abaissement de température, à cause de l'absorption de chaleur latente qui est nécessaire pour produire la fusion du corps soluble. — Gay-Lussac a constaté qu'en dissolvant 50^{gr} de chlorure de potassium, dans 200^{gr} d'eau contenus dans un vase suffisamment mince, on obtient un abaissement de température de 11°,4; en sorte que, si la température initiale est 15°, par exemple, la température finale est 3°,6. — En mélangeant rapidement des poids égaux d'azotate d'ammoniaque cristallisé et d'eau, on obtient un abaissement de température d'environ 26°; en sorte que, si l'eau et le sel sont à une température initiale de 12°, la température de la solution s'abaisse à — 14°; etc.

Toutefois, l'abaissement de température n'est pas toujours aussi marqué, pour les divers phénomènes qui paraissent s'accomplir dans des

circonstances semblables : quelquefois même, on voit la température s'élever. Il peut arriver, en effet, que les deux corps mis en présence, l'un à l'état solide, l'autre a l'état liquide, tendent à former par leur union un corps composé, qui soit à son tour soluble dans l'excès de liquide employé. l'effet definitif doit alors être la superposition de deux effets partiels, savoir un dégagement de chaleur, dû à la combinaison chimique, et une absorption de chaleur, due à la transformation physique du corps solide en un liquide. On conçoit que, dans certains cas, le premier de ces effets l'emporte sur le second, et que celui-ci prédomine au contraire, dans d'autres cas, sur le premier.

283. **Mélanges réfrigérants.** — C'est sur l'absorption de chaleur latente due à la fusion ou à la dissolution, qu'est fondé l'emploi de la plupart des mélanges réfrigérants.

Les mélanges réfrigérants les plus usuels peuvent être partagés en deux catégories : 1° les mélanges de sels avec l'eau ou avec les acides; 2° les mélanges de glace pilée ou de neige avec les sels, les acides, et en général avec les corps avides d'eau.

1° Comme exemple de mélanges de sels et d'eau, nous citerons le mélange d'azotate d'ammoniaque et d'eau, en parties égales. L'abaissement de température de ce mélange étant de 25 à 26 degrés, on peut, en y plongeant un corps dont la masse ne soit pas trop considérable, produire un refroidissement énergique. — L'expérience terminée, on pourra évaporer la solution, faire cristalliser le sel, et s'en servir pour une autre expérience.

Parmi les mélanges de sels avec les acides, l'un des plus employés est le mélange de 3 parties de sulfate de soude cristallisé et de 2 parties d'acide chlorhydrique, dont la température peut s'abaisser d'une trentaine de degrés. — On a construit des appareils connus sous le nom de *glacières*, dont la figure 215 indique la disposition, et qui peuvent servir à refroidir de l'eau, des sirops, etc., au moyen de ce mélange. Le sel et l'acide sont placés dans le vase de fer-blanc AB, lequel est entouré d'une enveloppe de drap qui le préserve du contact de l'air; les substances à refroidir sont placées dans le vase métallique CD; on agite vivement, de manière à accélérer l'opération, ce qui est évidemment une condition de succès, puisqu'il faut éviter autant que possible le réchauffement par l'air extérieur (*).

Fig. 215.

2° On obtient des mélanges réfrigérants plus énergiques en mélangeant de la glace pilée ou de la neige avec des sels, des acides, et en général

(*) L'expérience a appris qu'en opérant ainsi, 1200^{gr} de sulfate de soude et 800^{gr} d'acide chlorhydrique peuvent congeler 500^{gr} d'eau, si la température initiale des substances employées est d'environ 15°.

avec des substances avides d'eau. — Dans ces conditions, la glace absorbe pour se fondre une quantité de chaleur considérable; à ce premier effet, vient s'ajouter celui qui résulte de l'action exercée par l'eau de fusion sur la substance mélangée avec elle; cette seconde action peut d'ailleurs donner lieu, suivant les cas, à une absorption ou à un dégagement de chaleur, et l'effet définitif est le résultat de la superposition de ces actions — C'est ce qu'il est facile de rendre manifeste par quelques exemples :

Si l'on prend de la neige à 0°, et qu'on y verse de l'acide azotique du commerce ou de l'acide chlorhydrique (acides dont le mélange avec l'eau liquide ne donnent lieu à aucune élévation sensible de température), on produit une fusion rapide de la neige et le thermomètre peut descendre à 35° au-dessous de 0° (*). — De même, en projetant de la neige dans de l'alcool, on peut obtenir des températures très-basses.

Si on mélange la neige avec l'acide sulfurique (acide dont le mélange avec l'eau liquide donne une élévation de température qui peut aller jusqu'au delà de 105 degrés) les résultats obtenus sont très-divers, selon les proportions employées. Avec une petite quantité de neige, 1 partie pour 4 d'acide sulfurique, on obtient un mélange à + 80°; avec une grande quantité de neige, 4 parties pour 1 d'acide sulfurique, on obtient un mélange à — 20°.

Enfin, ce sont les mélanges de glace et de sels qui donnent les résultats les plus nets. — Le mélange le plus usité est formé de glace pilée et de sel marin cristallisé. Si l'on place les deux substances, par couches alternatives, dans un vase de verre, un thermomètre plongé dans la masse arrive rapidement à la température de —21°,2, au-dessous de laquelle il ne peut d'ailleurs descendre, quelles que soient les proportions relatives, ainsi que nous allons le montrer.

284. **Limite inférieure des températures que peut atteindre un mélange réfrigérant formé de glace et d'un sel.** — Prenons une solution saturée de sel marin dans l'eau et entourons-la d'un mélange réfrigérant quelconque, capable d'abaisser la température jusqu'à —35°; un thermomètre étant plongé dans la solution, nous le verrons indiquer des températures graduellement décroissantes jusqu'à —21°,2, et, à partir de ce moment, il se formera à la fois des cristaux de sel et des cristaux de glace. On conçoit donc qu'un mélange de glace et de sel marin, formé comme il a été dit dans le paragraphe précédent, ne puisse donner une température inférieure à —21°,2; puisque, s'il se refroidissait davantage, les cristaux se reformeraient avec dégagement de chaleur latente.

(*) Si les substances employées ont été d'abord refroidies bien au-dessous de 0°, et si l'air extérieur est suffisamment froid, cette même méthode peut atteindre à une température encore plus basse. Ainsi, c'est en employant un mélange de neige et d'acide azotique que Braun a pu, le premier, produire la congélation du mercure, à Saint-Pétersbourg, le 6 janvier 1760.

Dès lors, il est facile de se rendre compte des phénomènes qui se produisent quand on met une grande quantité de glace en présence d'une grande quantité de sel marin. Le sel détermine d'abord la fusion de quantités de glace de plus en plus grandes, et la température s'abaisse graduellement jusqu'à —21°,2. Mais alors le phénomène subit un temps d'arrêt, quoique les quantités de matières en présence puissent être suffisantes, si la fusion de toute la masse pouvait s'effectuer, pour abaisser encore beaucoup la température : il faut, pour que la fusion continue, que les corps environnants fournissent successivement de la chaleur, et la température demeure constante, au moins tant qu'il reste encore une quantité notable de matière à l'état solide.

On trouve, pour chaque sel, un résultat semblable, c'est-à-dire une limite inférieure pour les températures que peut atteindre le mélange de ce sel avec la glace : cette limite n'est autre que le *point de congélation de la solution saturée* de ce sel dans l'eau.

285. **Résultats numériques, relatifs aux températures que peuvent atteindre les mélanges de glace et de divers sels.** — Le tableau suivant indique les températures les plus basses que puissent atteindre les mélanges formés de glace et de quelques sels. Les nombres qu'il contient ont été déterminés, pour la plupart, par le point de congélation de la solution saturée : ils sont extraits, soit des mémoires de M. Rüdorff, soit d'un travail inédit de M. Nouel, auquel nous avons emprunté une partie des détails qui précèdent.

Sulfocyanure de potassium	—35°,2
Sel marin	—21°,2
Azotate d'ammoniaque	—16°,75
Chlorhydrate d'ammoniaque (sel ammoniac)	—15°,3
Chlorure de potassium	—10°,8
Azotate de potasse (nitre ou salpêtre)	— 2°,8

Le chlorure de calcium donne, avec la neige, un mélange réfrigérant des plus énergiques, dont la limite n'est pas encore connue : elle doit être voisine de — 50°. On emploie ce mélange, par exemple, pour opérer la congélation du mercure, qui a lieu à — 40°.

286. **Cristallisation par voie humide.** — On donne le nom de *cristallisation par voie humide* à la formation des cristaux qui se produisent lorsqu'un corps dissous dans un liquide passe à l'état solide, au sein du liquide lui-même. — Ce phénomène, que l'on produit fréquemment dans les laboratoires ou dans l'industrie, peut être obtenu par deux procédés assez différents, selon que la solubilité du corps sur lequel on veut opérer est variable ou non avec la température.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse d'un sel dont la solubilité dans l'eau croisse rapidement avec la température : tel serait l'azotate de potasse, dont un kilogramme d'eau ne peut dissoudre à 0° que 125 grammes,

tandis qu'il en dissout 2360 grammes à la température de 97°. — Une solution d'un pareil sel, *saturée* à la température de l'eau bouillante, c'est-à-dire contenant tout le sel que l'eau peut dissoudre à cette température, doit en abandonner une partie à l'état solide lorsqu'elle se refroidit. Le sel qui se sépare ainsi se dépose, sous la forme de cristaux d'autant plus volumineux que la masse liquide était elle-même plus considérable, qu'elle était maintenue dans un repos plus complet, et que le refroidissement s'est opéré avec plus de lenteur. — La plupart des produits cristallisés de l'industrie et des laboratoires, le sulfate de soude, le nitre, l'alun, le sulfate de cuivre, etc., etc., s'obtiennent par ce procédé.

Supposons, au contraire, qu'on ait à opérer sur un sel dont la solubilité dans l'eau soit à peu près la même à toute température : c'est ce qui a lieu, par exemple, pour le sel marin. — Alors, pour opérer la cristallisation par voie humide, le seul moyen à employer consiste à prendre d'abord une solution aussi voisine de la saturation que possible, et à enlever successivement, par l'évaporation, une partie du dissolvant ; le sel se dépose à mesure que la quantité d'eau diminue. — Sur les bords de la Méditerranée, l'évaporation se fait tout entière sous l'influence de la chaleur du soleil ; on obtient alors des cristaux assez gros, surtout quand l'air est tranquille. Dans les contrées plus froides, l'évaporation, commencée à l'air libre, se termine dans des chaudières que l'on chauffe artificiellement. Si, pendant que le sel se dépose, on agite continuellement le liquide, les cristaux qui se forment sont très-petits et très-purs ; c'est ainsi qu'on obtient le sel fin que l'on sert sur nos tables.—De même, en dissolvant du soufre dans le sulfure de carbone et abandonnant ensuite la solution à l'évaporation spontanée, on obtient ce corps en cristaux qui peuvent acquérir, à la longue, des dimensions considérables.

287. **Phénomènes de sursaturation.** — La cristallisation par voie humide présente des particularités absolument comparables à celles que nous avons signalées dans la cristallisation par voie sèche (278). — On sait, depuis longtemps, que si l'on introduit une solution chaude et concentrée de sulfate de soude dans un tube effilé, et si, après avoir fait bouillir pour chasser l'air (*fig.* 216), on ferme au chalumeau la partie étranglée C, et qu'on laisse ensuite refroidir, on peut conserver la solution *sursaturée* pendant un temps indéfini : ni l'agitation, ni les ébranlements ne peuvent produire la cristallisation. Mais si l'on vient à briser la pointe, on entend un sifflement qui annonce la rentrée de l'air, et la cristallisation a presque toujours lieu. Il y a une élévation de température très-sensible, due au dégagement de chaleur latente qui accompagne la solidification.

Dans cette expérience, et dans toutes les expériences analogues auxquelles d'autres solutions peuvent donner lieu, il paraît démontré que l'action exercée par la rentrée de l'air doit être attribuée à des particules du sel soumis à l'expérience, qui étaient disséminées dans l'atmosphère.

C'est ce qui résulte à la fois des expériences de M. Gernez et de celles de M. Violette : si l'on prend soin de faire passer sur une colonne de coton

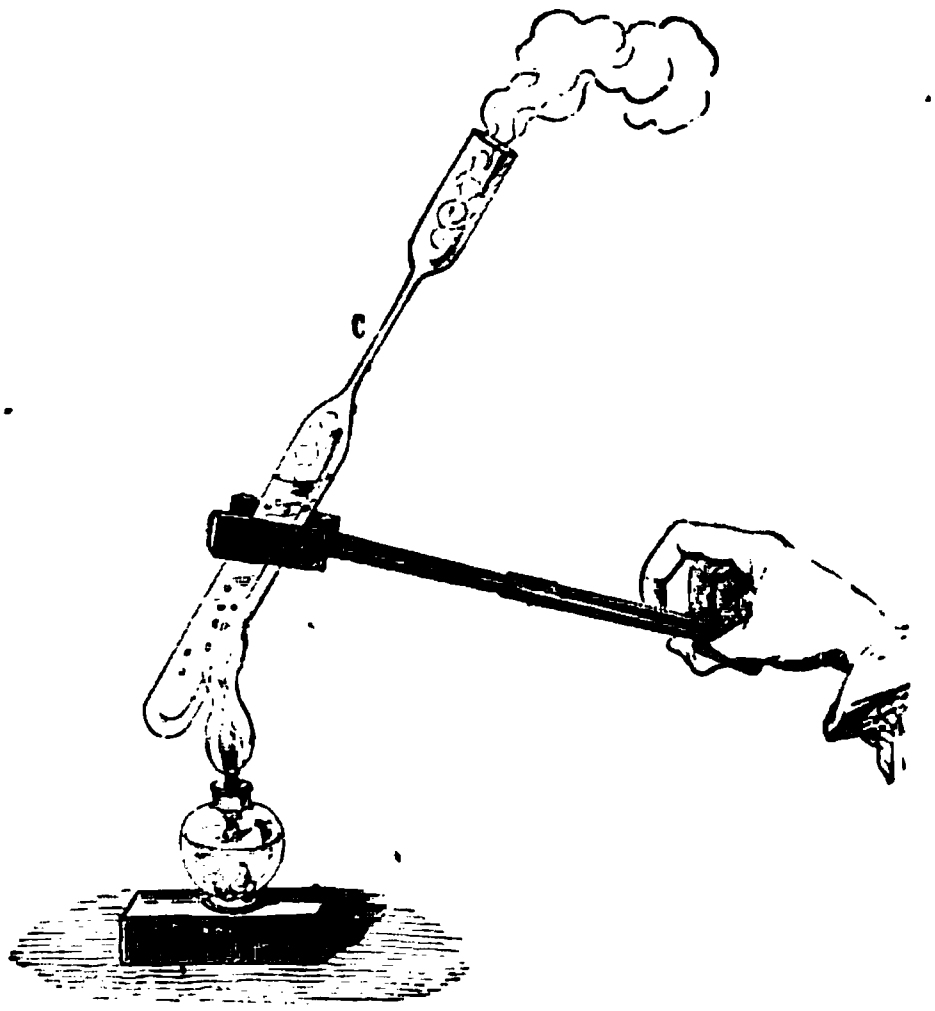


Fig. 216.

cardé ou d'amiante l'air qui est appelé dans les tubes, au moment où on les ouvre, la rentrée de cet air ne détermine plus la cristallisation. — Les mêmes observations ont été étendues déjà à un grand nombre d'autres solutions salines.

CHAPITRE VI

PROPRIÉTÉS DES VAPEURS

---

288. **Vaporisation, ébullition, évaporation.** — On donne généralement le nom de *vapeurs* aux fluides aériformes dans lesquels peuvent se transformer les corps liquides ou solides. L'état de vapeur ne diffère pas, en réalité, de l'état gazeux : nous verrons, en effet, que les vapeurs sont douées, comme les gaz proprement dits, d'une force élastique croissante avec la température; qu'elles suivent les lois de Mariotte et de Gay-Lussac d'autant plus exactement qu'elles sont plus éloignées de leurs points de liquéfaction. — Le passage d'un corps de l'état liquide à l'état gazeux, de quelque manière qu'il s'opère, est désigné par le terme général de *vaporisation*.

La vaporisation des liquidés peut être accompagnée de phénomènes assez différents, selon les circonstances dans lesquelles elle s'effectue. C'est ce qui a conduit à considérer deux modes de vaporisation : 1° l'*ébullition*, c'est-à-dire la production de vapeur dans toute la masse du liquide, sous la forme de bulles qui viennent crever à la surface; 2° l'*évaporation*, ou la production insensible de vapeurs à la surface libre du liquide.

Nous étudierons plus loin l'évaporation et l'ébullition: mais il est nécessaire, pour l'intelligence des lois qui les régissent, de connaître d'abord les propriétés générales des vapeurs.

I. — MESURE DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES VAPEURS FORMÉES DANS LE VIDE.

289. **Les liquides donnent naissance, dans le vide, à des vapeurs douées d'une force élastique analogue à celle des gaz proprement dits.** — Dans une cuvette AB (*fig.* 217) contenant du mercure, plongent plusieurs baromètres C, D, E, F; le mercure s'élève

dans tous à la même hauteur $m \ldots m''$. On introduit dans le baromètre D, à l'aide d'une pipette recourbée, une petite quantité d'eau; en E, de l'alcool; en F, de l'éther; chacun de ces liquides, plus léger que le mercure, s'élève jusque dans la chambre barométrique; dès qu'il y est parvenu, on voit le ménisque s'abaisser rapidement, puis osciller pendant quelques instants, et se fixer enfin d'une manière invariable. Les dépressions $m'p'$, $m''p''$, $m'''p'''$, sont d'autant plus grandes que le liquide est plus *volatil*, c'est-à-dire qu'il est plus voisin, à la température de l'expérience, de la température à laquelle il entrerait en ébullition. Si, par exemple, la température est de 10° pendant l'expérience, le mercure se déprime de 9 millimètres environ avec l'eau, de 24 millimètres avec l'alcool, et de 236 millimètres avec l'éther.

Fig. 217.

Or, on aurait pareillement constaté une dépression de la colonne de mercure, si, au lieu de faire passer dans l'un des tubes un liquide volatil, on y avait introduit quelques bulles d'air ou de tout autre gaz; la dépression aurait mesuré la force élastique du gaz, sous le volume qu'il occupe et à la température de l'expérience. — Donc, conformément à l'énoncé, les liquides donnent naissance, dans le vide, à des vapeurs douées d'une force élastique analogue à celle des gaz proprement dits.

Nous étudierons maintenant la vaporisation dans deux cas distincts : 1° celui où il ne reste plus de liquide dans la partie supérieure du baromètre après la vaporisation; 2° celui où la vapeur est encore en contact avec un excès du liquide qui lui a donné naissance. — Dans ce dernier cas, la chambre barométrique contient évidemment toute la vapeur qu'elle peut contenir à la température de l'expérience; on dit qu'elle est *saturée de vapeur*, ou que la vapeur y est *à saturation*.

290. **Vapeurs non saturantes.** — Reprenons l'appareil qui nous a servi à vérifier la loi de Mariotte sous des pressions inférieures à la pression atmosphérique, le *baromètre à cuvette profonde* (*fig.* 120). Établissons dans la cuvette deux tubes barométriques, l'un A (*fig.* 218), parfaitement sec, et maintenu dans une position invariable; l'autre B, renfermant une

certaine quantité de vapeur et pouvant s'enfoncer plus ou moins profondément dans la cuvette. La distance verticale des niveaux du mercure dans les deux tubes mesure, à un instant quelconque, la force élastique de la vapeur.

On enfonce d'abord le tube à vapeur B, en s'arrêtant avant que la vapeur commence à se liquéfier; puis on détermine le volume de la vapeur et sa force élastique; on soulève ensuite graduellement le tube (*fig.* 219 et 220), et pour chacune de ses positions successives B, B′, B″,... on effectue les mêmes mesures. On reconnaît que, d'une expérience à l'autre, le produit des deux nombres ainsi obtenus est sensiblement constant. En d'autres termes, si V, V′, V″,... désignent les volumes successifs occupés par la vapeur, P, P′, P″,.. les forces élastiques correspondantes, on trouve approximativement :

$$VP = V'P' = V''P'' = \ldots\ldots;$$

à mesure qu'on s'approche du point de saturation, ces produits présentent entre eux des différences d'autant plus considérables que la vapeur est plus comprimée.

Fig. 218. Fig. 219. Fig. 220.

On voit donc que les vapeurs *non saturantes* suivent la même loi de compressibilité que les gaz proprement dits, c'est-à-dire la loi de Mariotte; elles la suivent d'autant plus exactement qu'elles sont plus éloignées de leurs points de saturation respectifs. — L'expérience a montré également que les coefficients de dilatation des vapeurs non saturantes sont *du même ordre de grandeur que ceux des gaz.*

On voit donc qu'il n'y a aucune différence essentielle entre ces deux espèces de fluides élastiques : les corps désignés sous le nom de gaz, dans les conditions ordinaires de température et de pression, ne sont autre chose que des vapeurs assez éloignées de leur point de saturation.

201. **Vapeurs saturantes. Maximum de tension.** — Au contraire, si la vapeur contenue dans le tube B (*fig.* 218) se trouve en contact avec un excès du liquide générateur, les phénomènes sont tout différents. — Soit qu'on soulève le tube, soit qu'on l'enfonce dans la cuvette, la hauteur du mercure reste constante; le tube B ne fait que glisser, en quelque sorte, sur la colonne mercurielle qu'il renferme, sans que le sommet de celle-ci s'élève ou s'abaisse (*fig.* 221, 222, 223).

En d'autres termes, lorsqu'une vapeur est à saturation, on peut diminuer successivement le volume qu'elle occupe, sans que sa force élastique augmente. C'est ce qu'on exprime en disant que la vapeur est à son *maximum de tension*.

Il résulte évidemment de ce qui précède que, lorsqu'on diminue la chambre barométrique en enfonçant le tube B dans la cuvette, une certaine quantité de vapeur doit revenir à l'état liquide; inversement, quand on soulève le tube, le liquide doit émettre de nouvelles vapeurs, qui saturent l'espace nouveau. En observant avec attention la petite couche liquide qui surmonte le mercure, on voit, en effet, qu'elle augmente de hauteur quand on abaisse le tube, et qu'elle diminue quand on le soulève.

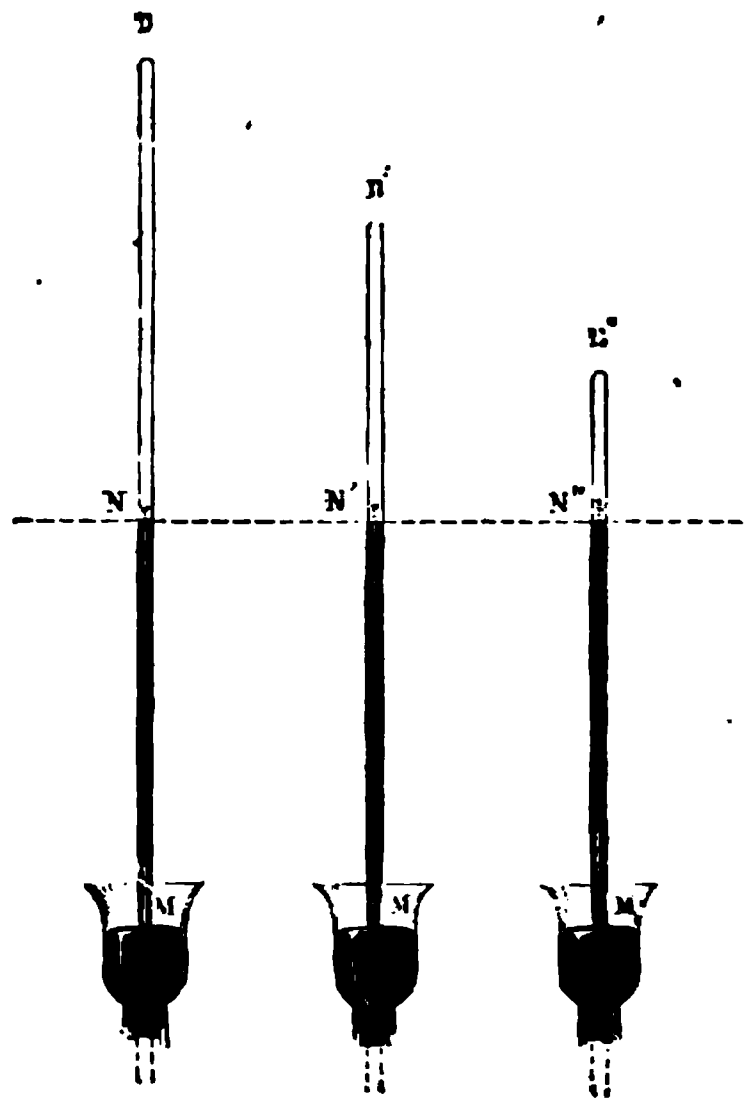


Fig. 221. Fig. 222. Fig. 223.

292. Influence de la température sur le maximum de tension. — Dans les expériences que nous venons de décrire, la température restait invariable. Voyons maintenant ce qui arrive quand la température vient à changer.

Et d'abord, il est facile de s'assurer que, à chaque température correspond un maximum de tension déterminé de la vapeur saturante : il suffirait, pour cela, de répéter les expériences en entourant les deux baromètres d'un manchon plein d'eau, qu'on porterait à diverses températures. — Ce maximum s'élève d'ailleurs avec la température : pour le démontrer, on peut employer deux baromètres plongeant dans une cuvette de fonte C (*fig.* 225), et entourés d'un manchon de verre renfermant de l'eau jusqu'en *mn* : le tube A seul contient un liquide volatil. On chauffe la cuvette à l'aide de quelques charbons; la chaleur se transmet du mercure à l'eau du manchon et au liquide renfermé dans le baromètre à vapeur. A mesure que la température s'élève, on voit baisser le sommet de la colonne mercurielle dans le tube A.

Il importe, dans un grand nombre de circonstances, de connaître le maximum de tension d'une vapeur à une température donnée. Nous allons décrire les procédés principaux à l'aide desquels on est parvenu à le déterminer, en nous occupant exclusivement d'abord de la vapeur d'eau.

293. **Tension de la vapeur d'eau au-dessous de 0°.** — *Gay-Lussac* a démontré que la glace émet, au-dessous de 0°, des vapeurs ayant une tension sensible ; il a mesuré cette tension pour diverses températures, à l'aide de l'appareil suivant :

A et B (*fig.* 224) sont deux baromètres plongeant dans une même cuvette C ; la partie supérieure du second est recourbée et pénètre dans le vase D, qui contient un mélange réfrigérant dont on évalue la température avec un thermomètre. On fait passer, dans le baromètre B, un peu d'eau au-dessus du mercure ; celle-ci émet des vapeurs qui se répandent dans la chambre barométrique. Mais une portion de cet espace étant maintenue à une température inférieure à la température ambiante, à — 10° par exemple, la vapeur n'y peut conserver une tension plus grande que celle qui correspond à — 10° ; elle s'y congèle donc en partie, fait place à de nouvelle vapeur envoyée par le liquide, laquelle se congèle à son tour, et ainsi de suite : toute l'eau introduite dans le baromètre vient donc, par une véritable distillation, se congeler peu à peu à la partie supérieure. — A ce moment, et bien qu'il ne reste plus de trace du liquide au-dessus du mercure, le niveau dans le baromètre B se trouve un peu plus bas que dans le baromètre sec. De cette observation, il résulte évidemment que la glace à — 10° émet des vapeurs ; la tension de ces vapeurs est mesurée par la distance verticale des deux niveaux du mercure.

Fig. 224. Fig. 225. — Appareil de Dalton.

294. **Tension de la vapeur d'eau entre 0° et 100° — Méthode de Dalton.** — Pour déterminer la tension de la vapeur d'eau aux températures comprises entre 0° et 100°, *Dalton* employait l'appareil déjà décrit (292) et représenté par la figure 225. L'eau était portée successi-

vement à des températures de plus en plus élevées, et ces températures étaient indiquées par des thermomètres fixés dans le liquide (*) ; on déterminait, à l'aide d'une règle métallique graduée, la dépression du mercure dans le baromètre à vapeur au-dessous du niveau dans le baromètre sec.

Cette dépression doit subir plusieurs corrections importantes, pour donner exactement la mesure de la force élastique cherchée. — Il faut tenir compte, en effet, et de la dilatation du mercure, et de celle de la règle, ainsi que nous l'avons fait pour les observations barométriques (253) ; on doit tenir compte ensuite du poids de la petite colonne d'eau qui presse sur le mercure du baromètre A ; enfin, il faut avoir égard aux actions capillaires qui s'exercent dans les deux tubes.

Remarquons ici que plus la température s'élève, plus le sommet du mercure s'abaisse dans le baromètre à vapeur ; on constate d'ailleurs qu'il vient se placer dans le plan du niveau extérieur au manchon, lorsqu'on atteint la température d'ébullition de l'eau sous la pression actuelle de l'atmosphère ; à cette température, la force élastique de la vapeur est donc égale à la pression atmosphérique. — De là résulte que l'appareil précédent ne peut servir à étudier la tension de la vapeur d'eau à des températures supérieures à 100 degrés, puisque, à ces températures, le niveau du mercure dans le baromètre A deviendrait invisible.

295. **Appareil de M. Regnault pour la mesure des tensions de la vapeur d'eau entre 0° et 60°.** — Pour obtenir des résultats exacts, dans les expériences qui précèdent, il serait indispensable de maintenir la température constante pendant quelques instants avant de faire une observation ; sans cela, il est impossible d'être certain que la température de la vapeur est bien celle qu'indiquent les thermomètres. Or l'appareil de Dalton ne satisfait que très-imparfaitement à cette condition, surtout pour les températures comprises entre 50° et 100°. Ce défaut est d'autant plus grave, que, déjà dans ces limites, une faible variation de température entraîne, comme on le verra, une variation considérable dans la force élastique.

Afin d'obtenir plus de précision dans la mesure des températures, M. Regnault a eu recours à la disposition suivante. Les deux baromètres sont fixés dans des tubulures *a* et *b*, pratiquées au fond d'une caisse de tôle VV (*fig.* 226), dont l'une des faces est fermée par une glace de verre EFGH ; cette caisse contient de l'eau, qui environne les parties supérieures des baromètres, et que l'on peut échauffer à l'aide d'un fourneau placé au-dessous. Le sommet du baromètre à vapeur communique par un tube capillaire *he* avec un ballon de verre A, contenant de l'eau : le tube capillaire lui-même est formé de deux parties, qui sont réunies par une pièce

(*) Pour assurer l'uniformité de température dans tout l'appareil, il est indispensable de mélanger sans cesse l'eau du manchon, au moyen de l'agitateur D.

de cuivre *f* à trois branches; la troisième branche communique avec une machine pneumatique, par l'intermédiaire d'un tube MN à ponce sulfurique.

Pour déterminer la tension de la vapeur dans le vide, on chauffe légèrement l'eau du ballon, de façon à en faire distiller une petite quantité dans le tube barométrique; on fait jouer ensuite la machine pneumatique : l'eau du ballon et celle du baromètre entrent en ébullition, tandis que l'air et la vapeur traversent le tube MN, où celle-ci se condense. Lorsqu'on a ainsi vaporisé quelques grammes d'eau, on peut admettre que l'air a été complétement expulsé de l'appareil; on ferme alors à la lampe le tube qui s'engage dans la troisième branche de la pièce *f*, on verse de l'eau dans la caisse, et on la porte successivement à diverses températures. A chaque fois, on relève, au cathétomètre, la différence de niveau du mercure dans les deux tubes barométriques, et on lit la température sur le thermomètre T (*). Enfin, on corrige les résultats obtenus comme nous l'avons indiqué plus haut (294).

Fig. 226. — Tension de la vapeur d'eau entre 0° et 60°; appareil de M. Regnault.

L'appareil que nous venons de décrire ne peut guère être employé que jusqu'à 60°. Dès que la force élastique est suffisante pour déprimer le mercure au-dessous du fond de la caisse, la vapeur n'étant plus tout entière à la température du bain, les indications du baromètre A n'ont plus aucune signification. Pour

(*) La masse d'eau contenue dans la caisse étant très-considérable, il est facile de la maintenir pendant assez longtemps à une température constante. Pour y parvenir, on l'échauffe d'abord jusqu'au voisinage de cette température, puis on ferme les issues du fourneau : le thermomètre continue à monter quelques instants encore, puis atteint un maximum qui se maintient pendant plusieurs minutes avant que la température recommence à décroître; on a d'ailleurs soin d'agiter continuellement l'eau de la caisse.

déterminer les tensions correspondantes aux températures intermédiaires entre 60° et 100°, M. Regnault a employé le même procédé que pour opérer au delà de 100°, procédé que nous allons maintenant indiquer.

296. **Tension de la vapeur d'eau aux températures élevées. — Expériences de Dulong et Arago.** — Les premières recherches exactes, faites en vue de déterminer les forces élastiques de la vapeur aqueuse à des températures élevées, sont dues à Dulong et Arago : elles datent de 1829.

L'appareil employé par ces physiciens consistait essentiellement en une chaudière à parois très-résistantes, où se formait la vapeur, et en un manomètre à air comprimé, qui en mesurait à chaque instant la tension. La température de la vapeur et celle de l'eau étaient données par des thermomètres contenus dans des tubes pleins de mercure, qui pénétraient à diverses profondeurs dans la chaudière. On commençait par chasser tout l'air de la chaudière, en ouvrant une soupape de dégagement et faisant bouillir l'eau pendant une vingtaine de minutes; on fermait ensuite cette soupape, et l'on rendait la température stationnaire successivement à divers degrés de l'échelle, en réglant convenablement le feu. A chaque fois, on lisait sur les thermomètres la température, et sur le manomètre la tension correspondante de la vapeur.

Fig. 227.

Ce procédé est sujet à deux objections. — La première résulte de la difficulté qu'il y avait à maintenir constantes, pendant un temps suffisamment long, des températures élevées; la seconde tient au défaut de sensibilité du manomètre à air comprimé, pour des pressions considérables.

297. **Principe de la méthode employée par M. Regnault.** — M. Regnault a écarté les deux causes d'erreurs que nous venons de signaler, en employant une méthode qui avait été antérieurement indiquée par Dulong, et en substituant un manomètre à air libre au manomètre à air comprimé.

Le principe de cette méthode est le suivant : *La force élastique de la vapeur émise par un liquide en ébullition est égale à la pression qui s'exerce sur sa surface.* — Ce principe, dont nous montrerons plus loin la généralité, et que les expériences de Dalton ont déjà établi pour le cas où la pression est d'une atmosphère (294), peut encore se vérifier, dans ce même cas particulier, par l'expérience suivante :

Un tube recourbé ABC (*fig.* 227), ayant la forme d'un tube de Mariotte tronqué, contient du mercure dans sa branche fermée BC. On fait passer un peu d'eau à la partie supérieure de cette branche, puis on suspend l'appareil dans un grand ballon de verre, renfermant de l'eau qu'on porte à l'ébullition. Bientôt on voit le liquide qui est en C se réduire en vapeur; le mercure s'abaisse dans la branche fermée et s'élève dans la branche ouverte. Enfin, quand l'ébullition est en pleine activité, et que la température est la même dans le tube et dans le ballon, les niveaux du mercure sont à la même hauteur dans les deux branches. A ce moment donc, la force élastique de la vapeur est égale à celle de l'atmosphère.

298. **Appareil de M. Regnault.** — L'appareil employé par M. Regnault est représenté par la figure 228. A est une chaudière de cuivre, qui renferme de l'eau; deux thermomètres *t* et *t'*, préalablement com-

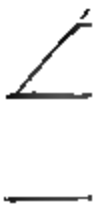


Fig. 228. — Mesure des tensions de la vapeur d'eau aux températures élevées : appareil de M. Regnault.

parés au thermomètre à air, sont contenus dans des tubes plongeants pleins de mercure, et donnent les températures de l'eau et de la vapeur. Un tube incliné *ab* met en communication la chaudière avec un grand ballon métallique B, dans lequel on peut faire un vide partiel ou comprimer de l'air à différentes pressions ; ces pressions sont indiquées par le manomètre à air libre KPO ; le ballon est enveloppé, dans le vase C, d'une masse d'eau considérable, destinée à en maintenir la température constante. La vapeur formée par l'ébullition passe dans le tube *ab*, où elle se liquéfie pour retomber à l'état d'eau dans la chaudière ; cette condensation s'obtient en faisant circuler, dans le manchon *mn* qui entoure le tube *ab*, un courant continuel d'eau froide venant du vase D.

D'après le principe précédent, lorsque l'eau bout dans la chaudière, la force élastique de sa vapeur est égale à la pression artificielle qui s'exerce sur sa surface, c'est-à-dire à la tension de l'air contenu dans le ballon B ; et, comme la température d'ébullition demeure rigoureusement constante aussi longtemps que la pression reste invariable, les observations comportent une précision absolue. Elles se réduisent à noter, d'une part la température donnée par le thermomètre plongeant dans la vapeur, d'autre part la force élastique mesurée par le manomètre à air libre. — On peut faire plusieurs fois chacune de ces lectures, et s'assurer, par la constance des résultats obtenus, de la légitimité de la méthode elle-même. En cela, le procédé diffère donc complétement de celui de Dulong et Arago.

Tel est le procédé dont M. Regnault a fait usage pour déterminer les tensions de la vapeur d'eau, d'abord entre 50° et 100°, en raréfiant l'air dans le ballon B; puis entre 100° et 230°, en y comprimant de l'air sous des pressions graduées. — Pour les pressions considérables, le manomètre de la figure 228 était remplacé par le grand manomètre à air libre qui avait servi pour les recherches sur la loi de Mariotte (*fig.* 125).

299. **Tables numériques.** — Des expériences faites à un grand nombre de températures différentes ont permis à M. Regnault de dresser des tables qui donnent les forces élastiques de la vapeur d'eau, pour les températures comprises entre — 30° et + 230° (*).

(*) Les nombres consignés dans ces tables ont été déduits par le calcul de ceux qu'avait fournis l'expérience directe : en effet, il eût été très-difficile, et surtout très-long, de faire varier la température, d'une expérience à la suivante, suivant une loi déterminée. On a cherché alors à calculer, au moyen des données de l'observation directe, une *formule empirique*, c'est-à-dire une relation entre la température et la tension de la vapeur, qui permît de trouver, pour une température donnée quelconque, la tension correspondante.

Dans le mémoire de M. Regnault, la table générale I donne les forces élastiques de la vapeur de degré en degré ; les tables II et III font connaître ces forces élastiques de dixième en dixième de degré, entre des limites de température plus rapprochées : le défaut d'espace nous empêche de les reproduire intégralement.

I. — FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR D'EAU ENTRE — 30° ET + 230°.

TEMPÉRATURE.	FORCE ÉLASTIQUE en MILLIMÈTRES.	TEMPÉRATURE.	FORCE ÉLASTIQUE en MILLIMÈTRES.	TEMPÉRATURE.	FORCE ÉLASTIQUE en MILLIMÈTRES.
— 30°	0,39	60	148,79	150	3581,23
— 20	0,93	70	233,05	160	4651,62
— 10	2,09	80	354,64	170	5961,66
0	4,60	90	525,45	180	7546,39
10	9,16	100	760,00	190	9128,00
20	17,39	110	1075,37	200	11688,96
30	31,58	120	1491,28	210	14324,80
40	54,91	130	2050,28	220	17390,35
50	91,98	140	2717,65	230	20922,40

II. — FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR D'EAU ENTRE 85° ET 101°.

TEMPÉRATURE.	FORCE ÉLASTIQUE en MILLIMÈTRES.	TEMPÉRATURE.	FORCE ÉLASTIQUE en MILLIMÈTRES.	TEMPÉRATURE.	FORCE ÉLASTIQUE en MILLIMÈTRES.
85°	453,01	99,0	733,21	100,2	765,46
90	525,45	99,2	738,50	100,4	771,95
95	633,78	99,4	743,83	100,6	776,48
96	657,54	99,6	749,18	100,8	782,04
97	682,03	99,8	754,57	101,0	787,63
98	707,26	100,0	760,00		

III. — FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR D'EAU ENTRE — 10° ET + 35°.

TEMPÉRATURE.	FORCE ÉLASTIQUE en MILLIMÈTRES.	TEMPÉRATURE.	FORCE ÉLASTIQUE en MILLIMÈTRES.	TEMPÉRATURE.	FORCE ÉLASTIQUE en MILLIMÈTRES.
— 10°	2,078	+ 6°	6,998	+ 21°	18,495
9	2,261	7	7,492	22	19,659
8	2,456	8	8,017	23	20,888
7	2,666	9	8,574	24	22,184
6	2,890	10	9,165	25	23,550
5	3,131	11	9,792	26	24,988
4	3,387	12	10,457	27	26,505
3	3,662	13	11,062	28	28,101
2	3,955	14	11,906	29	29,782
1	4,267	15	12,699	30	31,548
0	4,600	16	13,635	31	33,405
+ 1	4,940	17	14,421	32	35,359
2	5,302	18	15,357	33	37,410
3	5,687	19	16,346	34	39,565
4	6,097	20	17,391	35	41,827
5	6,534				

* 300. **Thermomètre hypsométrique.** — La pression barométrique diminuant à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, il en est de même de la température d'ébullition de l'eau. Or si, en un lieu et à un instant déterminés, on mesure par l'expérience la température d'ébullition de l'eau, quand cette température est connue, le tableau II fait connaître la force élastique de la vapeur et par suite la pression barométrique qui lui est égale. On comprend donc que, avec un thermomètre suffisamment sensible, on puisse déterminer indirectement la pression de l'atmosphère au pied et au sommet d'une montagne : on en pourra déduire ensuite la hauteur de la montagne elle-même.

Le *thermomètre hypsométrique* (ὕψος, hauteur, μέτρον, mesure) de M. Regnault ne porte sur sa tige que les températures comprises entre 85° et 101°; chaque degré est divisé en 20 parties égales (*).

301. **Tension des vapeurs des divers liquides.** — M. Regnault a employé les appareils précédemment décrits à la détermination des tensions des vapeurs d'un certain nombre de liquides et de gaz liquéfiés. Le tableau ci-contre contient quelques-uns des résultats obtenus.

Certains liquides n'émettent pas, à la température ordinaire, de vapeurs appréciables : tels sont l'acide sulfurique et les huiles grasses. Si l'on place sous le récipient de la machine pneumatique deux verres renfermant, l'un de l'acide sulfurique et l'autre un sel de baryte en dissolution, on n'aperçoit dans le second verre, même au bout d'un temps fort long, aucun précipité de sulfate de baryte.

Le mercure n'émet, aux températures ordinaires de l'atmosphère, que des vapeurs dont la tension est extrêmement faible. Le tableau ci-contre montre que, même à 50°, la tension de la vapeur mercurielle est presque insensible; il en résulte que, dans les mesures barométriques et manométriques effectuées à la température de l'atmosphère, il n'est pas nécessaire de tenir compte de la force élastique des vapeurs de mercure. — Cependant les expériences récentes de M. Merget ont démontré que les vapeurs émises par le mercure peuvent encore être rendues sensibles jusqu'à — 44°, c'est-à-dire à une température inférieure à celle de la solidification du métal, et que, contrairement à l'opinion de Faraday, ces vapeurs se répandent toujours à une distance considérable du liquide qui les a produites : c'est ce que montre l'action de ces vapeurs sur des réactifs très-sensibles, tels que les sels d'or, de palladium ou d'argent.

(*) En jetant les yeux sur le tableau II, on voit qu'il ne faut pas attendre de cette méthode indirecte, pour déterminer la pression, une aussi grande précision que de la mesure barométrique directe; en effet, au voisinage de 100°, une variation de température de $\frac{1}{20}$ de degré correspond à une variation de 1 millimètre au moins dans la pression; celle-ci ne peut donc être mesurée au moyen du thermomètre qu'à 1 millimètre, ou tout au plus à $\frac{1}{2}$ millimètre près.

TEMPÉRATURE.	FORCE ÉLASTIQUE EN MILLIMÈTRES.	TEMPÉRATURE.	FORCE ÉLASTIQUE EN MILLIMÈTRES.
ACIDE SULFUREUX.			
— 25°	374	0°	1165
— 20	469	+ 30	3432
— 10	762	60	8124
ALCOOL.			
0°	15	50°	220
10	24	100	1695
20	44	150	7259
AMMONIAQUE.			
— 87°	441	— 20°	4273
— 30	2809	0	7709
CHLOROFORME.			
+ 20°	160	75°	1211
30	246	100	2426
40	366	130	4866
50	531	160	8658
ÉTHER.			
— 20°	67	+ 40°	909
— 10	113	60	1728
0	183	100	4951
+ 20	433	120	7702
MERCURE.			
0°	0,02	300°	242
50	0,11	400	1588
100	0,74	500	6320
200	19,90		
SULFURE DE CARBONE.			
— 20°	43	+ 60°	1164
0	132	100	3329
+ 20	302	120	5145
40	617	140	7557

II. — MÉLANGES DES GAZ ET DES VAPEURS.

302. Les vapeurs acquièrent dans les gaz la même tension que dans le vide, à la même température. — Cette loi, énoncée par Dalton, se vérifie au moyen de l'appareil suivant qui a été proposé par Gay-Lussac. — AB (*fig.* 229) est un manomètre à air libre dont la branche A est formée par un gros tube, divisé en parties d'égales capacités. Ce tube s'engage à ses deux extrémités dans des viroles de fer C et D, munies de robinets r et r''; de la virole D, part une tubulure latérale dans laquelle est mastiquée la branche B du manomètre; sur le robinet de la virole C on peut visser, soit un ballon M muni lui-même d'un robinet r', soit un robinet particulier dont nous parlerons un peu plus loin.

Le manomètre étant bien desséché, on l'emplit entièrement de mercure, après quoi, on adapte le ballon M plein d'air ou de tout autre gaz sec. On ouvre les trois robinets r, r', r'' : une certaine quantité de mercure s'écoule dans le vase V et est remplacée dans le tube A par du gaz venu du ballon; lorsqu'on en a introduit une quantité suffisante, on ferme les robinets, on détache le ballon M, et l'on ramène le gaz à la pression de l'atmosphère en versant du mercure dans le tube B.

Fig. 229. — Mélange des gaz et des vapeurs; appareil de Gay-Lussac

On adapte alors un robinet R (représenté à droite de la figure, à une échelle beaucoup plus grande), qui sert à l'introduction du liquide. Le noyau de ce robinet n'est percé qu'à demi; dans quelque position qu'on le tourne, il ne peut donc y avoir communication entre l'atmosphère et l'appareil. On verse une certaine quantité de liquide dans l'entonnoir qui surmonte R, et l'on fait tourner plusieurs fois de suite la clef de ce robinet sur elle-même : à chaque tour, la cavité qu'elle contient s'emplit du liquide de l'entonnoir, et le déverse ensuite dans le manomètre, où il se

volatilise. On continue ainsi jusqu'à ce qu'on aperçoive au-dessus du mercure un excès de liquide non volatilisé. — A mesure que la vapeur se forme dans le tube A, le niveau du mercure se déprime dans ce tube et s'élève en B; une fois la saturation atteinte, ce qu'on reconnaît à la constance des niveaux, on peut procéder à la mesure de la tension de cette vapeur. Pour cela, on ramène le volume à ce qu'il était d'abord, en versant du mercure par la branche B; on détermine ensuite la différence de hauteur des deux niveaux. L'expérience prouve qu'elle est précisément égale à la force élastique de la vapeur du liquide dans le vide, à la même température.

303. **Loi du mélange des gaz et des vapeurs.** — Dans l'expérience précédente, on a mesuré la tension de la vapeur après avoir ramené le volume du mélange au volume primitif du gaz sec : on a trouvé que, dans ces conditions, la force élastique de ce mélange est égale à celle de l'atmosphère, plus la tension maximum de la vapeur dans le vide à la même température. — Donc, *la force élastique d'un mélange de gaz et de vapeur est égale à la somme des forces élastiques qu'auraient séparément le gaz et la vapeur si chacun d'eux occupait seul le volume du mélange.* C'est une loi exactement semblable à celle du mélange des gaz (148).

La même loi s'appliquerait encore au cas où la vapeur ne serait pas à saturation, car alors cette vapeur suivrait la loi de Mariotte, et se comporterait elle-même comme un gaz proprement dit.

L'appareil de Gay-Lussac permet de vérifier également la loi lorsque la force élastique initiale du gaz sec est un peu plus grande ou un peu moindre que la pression atmosphérique.

* 304. **Particularités offertes par la formation des vapeurs dans les gaz.** — Il résulte d'expériences de M. Regnault, faites sur le même sujet, que la vaporisation des liquides dans les gaz diffère de la vaporisation dans le vide en ce que le *point de saturation* n'est atteint qu'au bout d'un certain temps, souvent assez long. — M. Regnault pense même que, dans des appareils de verre, ce point n'est jamais rigoureusement obtenu : il a observé, en effet, que la force élastique du mélange est toujours inférieure, d'une quantité très-petite il est vrai, à la somme des forces élastiques du gaz et de la vapeur. Il explique cette différence en admettant, de la part du verre, une action condensante, qui déterminerait la liquéfaction d'une quantité de vapeur d'autant plus grande que la tension de la vapeur dans le mélange serait plus considérable.

III. — DENSITÉS DES VAPEURS.

305. **Définition.** — Les densités des vapeurs par rapport à l'eau étant toujours, comme celles des gaz, exprimées par des nombres très-petits, on préfère introduire, dans les calculs, leurs densités par rapport à l'air. — On appelle *densité d'une vapeur par rapport à l'air*, ou simplement *den-*

sité de cette vapeur, le rapport entre les poids de deux volumes égaux de vapeur et d'air, pris dans les mêmes conditions de température et de pression.

Cette définition, tout à fait semblable à celle de la densité d'un gaz proprement dit (261), suppose que la vapeur soit prise à une température assez éloignée de son point de liquéfaction pour qu'on puisse, sans erreur sensible, la regarder comme obéissant aux lois de Mariotte et de Gay-Lussac.

306. **Procédé de M. Dumas.** — Le procédé le plus habituellement suivi dans la détermination des densités des vapeurs, est dû à M. Dumas. Il reproduit, à la forme des appareils près, le procédé employé pour la recherche des densités des gaz, et plus particulièrement celui que nous avons appliqué au chlore (269).

On prend un ballon A, de 250 à 500 centimètres cubes de capacité, dont on étire le col en pointe fine, ainsi que le représente la figure 230. On le place sur un des plateaux d'une balance, en mettant à côté de lui un poids marqué, de 2 grammes par exemple, et l'on établit la tare à l'aide d'un autre ballon à peu près pareil. On note la température t du laboratoire et la pression barométrique H, puis on introduit dans le ballon A une certaine quantité du liquide dont on cherche la densité de vapeur (*). — On assujettit ce ballon comme le montre la figure, et on le fait plonger dans un bain d'eau, d'huile ou d'alliage fusible, de manière à obtenir toujours une température très-notablement supérieure au point d'ébullition du liquide intérieur. Le liquide contenu dans le ballon entre en ébullition : sa vapeur s'échappe par la pointe effilée, sous la forme d'un jet, et entraîne avec elle l'air intérieur; lorsque

Fig. 230. — Détermination de la densité des vapeurs, procédé de M. Dumas.

(*) Il suffit, pour cela, de chauffer légèrement le ballon, et de le laisser ensuite refroidir, en plongeant la pointe ouverte dans le liquide qui doit être soumis à l'expérience : la contraction de l'air, produite par le refroidissement, fait pénétrer une petite quantité de liquide dans l'appareil.

le jet cesse de se produire, on maintient la température constante pendant quelques instants, et l'on ferme la pointe au chalumeau. On note à ce moment la température T du bain et la pression atmosphérique H′; on retire le ballon, on l'essuie, et on le reporte dans la balance. Supposons, pour fixer les idées, qu'il ait augmenté de poids; il faudra, pour établir l'équilibre, diminuer d'une certaine quantité p les 2 grammes placés à côté de lui. Cette quantité p exprime l'excès du poids P′ de la vapeur qui remplit le ballon à la température T et sous la pression H′, sur le poids P de l'air que contenait ce même ballon à la température t et sous la pression H.

Il faut trouver maintenant le poids P; une fois qu'il sera connu, on en déduira P′, car

$$P' = p + P;$$

pour obtenir P, on cherche le volume intérieur du ballon. A cet effet, on plonge la pointe sous le mercure et on la brise; la vapeur intérieure s'étant condensée, le mercure se précipite dans le ballon et le remplit entièrement. On verse le mercure dans une éprouvette graduée, afin d'en déterminer le volume; ce volume, ramené à 0°, fait connaître la capacité intérieure V_0 du ballon à la même température. On aura donc immédiatement le poids P par la formule générale :

$$P = V_0 (1 + kt)\, 1^{gr},293 \frac{H}{760} \frac{1}{1 + \alpha t},$$

On en déduit :

$$P' = p + V_0 (1 + kt)\, 1^{gr},293 \frac{H}{760} \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

C'est là le poids de la vapeur qui remplit le ballon à la température T et sous la pression H′.

Il nous reste à trouver le poids P_1 de l'air que contiendrait le ballon dans les mêmes conditions de pression et de température; ce poids est évidemment :

$$P_1 = V_0 (1 + kT)\, 1^{gr},293 \frac{H}{760} \frac{1}{1 + \alpha T},$$

et si l'on divise P′ par P_1, le quotient exprime la densité cherchée.

Nous avons supposé que, au moment où l'on brise sous le mercure la pointe du ballon, celui-ci s'emplit entièrement. Quelquefois cependant, la vapeur du liquide volatil n'a pas expulsé la totalité de l'air; on en retrouve alors une bulle dans le ballon après la rentrée du mercure. On la fait passer au sommet d'une éprouvette graduée, on en mesure le volume à une température et à une pression connues, et l'on en déduit le poids. Ces données permettent d'effectuer les corrections que nécessite la présence de cet air.

307. *MM. H. Sainte-Claire Deville et Troost* ont appliqué la méthode de M. Dumas à la recherche des densités de vapeur des liquides qui n'entrent en ébullition qu'à des températures auxquelles le verre se ramollit. Ils ont employé, dans leurs expériences, des ballons de porcelaine qu'ils portaient aux températures fixes du mercure, du soufre ou du cadmium bouillants.

308. **Résultats.** — Ainsi qu'on devait s'y attendre, si l'on détermine la densité d'une même vapeur par rapport à l'air, à des températures différentes, on obtient en général des résultats différents; mais à mesure qu'on s'éloigne du point d'ébullition du liquide qui a fourni la vapeur, ces résultats tendent vers l'égalité. Nous arrivons ainsi à reconnaître, une fois de plus, que les vapeurs sont de véritables gaz, lorsqu'on les prend suffisamment loin de leurs points de saturation, et qu'elles suivent, dans ces conditions, les lois de Mariotte et de Gay-Lussac comme les gaz proprement dits.

Certaines vapeurs éprouvent, avec les variations de température, des variations de densité très-considérables. Suivant M. Cahours, la densité de l'acide acétique est 3,20 à 125°, et seulement 2,09 à 230°. A partir de cette limite, elle reste sensiblement constante, car à 338° elle a été trouvée égale à 2,08.

La vapeur de soufre présente une anomalie du même genre : suivant M. Bineau, sa densité prise à la température de 1000° n'est que le tiers de celle qu'on trouve en opérant à 500°. Ce résultat a été mis hors de doute par les expériences de MM. Deville et Troost.

Nous réunissons dans le tableau suivant les densités d'un certain nombre de vapeurs.

DENSITÉS DE QUELQUES VAPEURS.

NOMS DES SUBSTANCES.	DENSITÉS DE LEURS VAPEURS.
Alcool	1,613
Eau	0,622
Éther	2,586
Iode	8,716
Mercure	6,976
Phosphore	4,420
Soufre	2,206

Il est important, pour les applications, de connaître la densité de la vapeur d'eau, 0,622. — On emploie souvent aussi dans les calculs la valeur $\frac{5}{8}$, qui est peu différente de la fraction précédente.

309. **Calculer le poids de vapeur d'eau qui est contenu dans un volume déterminé d'air saturé, à une température connue.** — La tension de la vapeur est la même dans l'air que dans le vide à la

même température (302); et si l'on admet en outre (ce que du reste M. Regnault a vérifié par des expériences directes), que la densité de la vapeur à saturation est aussi la même dans l'air que dans le vide, à égalité de température, on trouvera le poids p de la vapeur qui sature un volume V d'air à la température de t degrés, en remplaçant, dans la formule générale établie précédemment (268), la densité d par 0,622 et la force élastique H par la tension maximum F de la vapeur d'eau à t degrés :

$$(1) \qquad p = V \times 1^{gr},293 \times 0,622 \times \frac{F}{760} \times \frac{1}{1+\alpha t},$$

ou encore, en employant la densité approchée $\frac{5}{8}$,

$$(1^{bis}) \qquad p = V \times 1,293 \times \frac{5}{8} \times \frac{F}{760} \times \frac{1}{1+\alpha t} (*).$$

310. **Calculer le poids total d'un volume déterminé d'air saturé de vapeur d'eau, à une température connue.** — Le poids total P d'un volume déterminé V d'air saturé de vapeur d'eau se compose de deux parties : le poids p de la vapeur, et le poids p' de l'air supposé sec. Or, d'après la loi du mélange des gaz et des vapeurs, si l'on désigne par H la force élastique totale de l'air humide, celle de l'air supposé sec et occupant le même volume V est H — F. La formule établie plus haut (268) donne donc le poids p', en y remplaçant d par l'unité et H par H — F, savoir :

$$p' = V \times 1^{gr},293 \times \frac{H-F}{760} \times \frac{1}{1+\alpha t},$$

en ajoutant à cette valeur de p' la valeur de p donnée par l'expression (1) du paragraphe précédent, il vient :

$$P = V \times 1^{gr},293 \times \frac{1}{1+\alpha t} \times \frac{1}{760} \times (H - F + 0,622.F),$$

ou bien

$$(2) \qquad P = V \times 1^{gr},293 \times \frac{1}{1+\alpha t} \times \frac{H - 0,378.F}{760}.$$

Si l'on prend pour densité de la vapeur d'eau la valeur $\frac{5}{8}$, c'est-à-dire pour valeur du poids p de la vapeur l'expression (1^{bis}) du paragraphe précédent, on a :

(*) Il est bon de rappeler ici que, dans ces formules, p est exprimé en grammes, et V en litres. — Même remarque pour les formules (2) et (2^{bis}) du paragraphe suivant.

$$P = V \times 1^{gr},293 \times \frac{1}{1 + \alpha t} \times \frac{1}{760}\left(H - F + \frac{5}{8.}F\right),$$

ou bien

$$(2^{bis}) \qquad P = V \times 1^{gr},293 \times \frac{1}{1 + \alpha t} \times \frac{\left(H - \frac{3}{8}F\right)}{760}.$$

Cette dernière formule est très-fréquemment employée.

CHAPITRE VII

DIVERS MODES DE FORMATION DES VAPEURS. — CONDENSATION DES VAPEURS ET DES GAZ

I. — ÉVAPORATION.

311. **Évaporation.** — On désigne sous le nom d'*évaporation* la production de vapeur qui s'effectue à la surface libre d'un liquide.

D'après ce qu'on a vu dans le chapitre précédent, il suffit que le liquide présente une surface libre pour que la production de vapeur ait lieu. — Quand l'espace où elle peut se répandre est limité, que cet espace soit vide ou occupé par un gaz, la vapeur se produit toujours, jusqu'à ce que sa force élastique acquière la valeur qui caractérise le maximum de tension correspondant à la température actuelle. — Si l'espace offert à la vapeur est illimité, ou si, l'espace étant limité, la vapeur qui se forme est successivement éliminée d'une manière quelconque, l'évaporation doit continuer d'une manière régulière, jusqu'à ce que tout le liquide ait disparu.

Il nous suffira d'énoncer les principales conditions qui peuvent faire varier la rapidité de l'évaporation, pour que l'on conçoive immédiatement l'influence de chacune d'elles.

312. **Des conditions qui influent sur la rapidité de l'évaporation.** — C'est à Dalton qu'est due l'étude des causes qui rendent l'évaporation plus ou moins rapide. Les plus importantes sont les suivantes :

1° *Température du liquide.* — La tension de la vapeur augmentant rapidement avec la température (299), l'évaporation est d'autant plus rapide, toutes choses égales d'ailleurs, que la température du liquide est plus élevée.

2° *Température de l'espace environnant.* — La température du milieu ambiant, lorsqu'elle est différente de celle du liquide, favorise d'autant

plus l'évaporation qu'elle est plus élevée ; cela tient à ce que la vapeur tend à saturer l'espace environnant : elle doit donc se former en quantité d'autant plus considérable, dans un temps donné, que cet espace en peut admettre davantage, et par suite que sa température est plus élevée.

3° *Étendue de la surface libre.* — L'étendue de la surface libre du liquide a sur l'évaporation une influence évidente, puisque, toutes choses égales d'ailleurs, la quantité de vapeur formée dans un temps donné doit être proportionnelle à la surface par laquelle elle peut se produire. — La concentration des eaux de la mer dans les marais salants, celle des eaux des sources salées, dans les bâtiments de graduation, présentent une application directe de ce principe.

4° *Quantité de vapeur contenue dans l'espace environnant.* — Toutes les autres conditions restant encore les mêmes, l'évaporation doit être d'autant plus rapide que l'espace environnant est plus éloigné de la saturation. Suivant Dalton, la quantité de liquide évaporée dans un temps donné est *proportionnelle à l'excès de la tension maximum de la vapeur, pour la température de l'expérience, sur la tension de la vapeur qui existe dans l'atmosphère.* — Cette loi n'est sensiblement exacte que si la différence des deux tensions n'est pas très-considérable et si l'air est suffisamment calme.

5° *Agitation de l'air.* — Dans une atmosphère parfaitement tranquille, l'évaporation est lente, parce que la même couche d'air demeure à la surface du liquide après s'être saturée de vapeur. Quand l'air est agité, les couches saturées sont promptement remplacées par d'autres couches, pouvant recevoir de nouvelles vapeurs. — Par là s'explique l'action desséchante de certains vents du nord qui, même pendant l'hiver, sèchent plus vite la terre que ne le font les plus grandes chaleurs de l'été.

On trouve encore une application du même principe dans les séchoirs. Ce sont de grands hangars où l'on suspend les étoffes humides, ou en général les objets qu'on veut mettre à sécher ; des persiennes sont disposées sur les quatre côtés, de manière à favoriser la rapide circulation de l'air dans l'intérieur.

515. **Du froid produit par l'évaporation. — Expériences de Leslie.** — Nous verrons plus loin que la conversion d'un liquide en vapeur est accompagnée, comme la conversion d'un corps solide en liquide (274), d'une absorption de chaleur latente. Or, quand la vaporisation se fait sans l'intervention d'un foyer calorifique, la vapeur qui se forme doit emprunter cette chaleur au liquide lui-même et au vase qui le contient ; de là résulte un abaissement de température, qui peut parfois être très-considérable.

C'est ce que montre, par exemple, l'expérience suivante, dont l'idée première est due à Leslie. — Sur une petite capsule de liége A (*fig.* 231), couverte intérieurement d'une couche de noir de fumée, on verse quelques gouttes d'eau ; on dispose cette capsule, au moyen d'un trépied en fils

métalliques, au-dessus d'une large cuvette de verre V qui contient de l'acide sulfurique concentré. L'appareil étant placé sous le récipient de la machine pneumatique, on fait le vide aussi exactement que possible, puis on ferme la clef de la machine; au bout de dix à quinze minutes, toute l'eau est congelée. — Il est facile de se rendre compte de ce qui se passe dans cette expérience : l'eau répandue sur la capsule s'évapore d'autant plus rapidement que le vide est plus parfait : l'acide sulfurique, en absorbant la vapeur à mesure qu'elle se produit, concourt également à rendre la vaporisation plus rapide. La vapeur emprunte à l'eau la chaleur latente nécessaire à sa vaporisation; et comme le liquide ne touche que très-imparfaitement la capsule qui le soutient, il ne peut lui prendre que très-peu de chaleur pour compenser les pertes qu'il éprouve; il doit donc se refroidir rapidement, et l'on conçoit qu'il arrive à se congeler (*).

Fig. 231. — Expérience de Leslie. Congélation de l'eau dans le vide.

Fig 232. — Cryophore de Wollaston.

314. **Cryophore de Wollaston.** — La congélation de l'eau dans le vide peut se faire encore d'une manière très-simple, et sans le secours de la machine pneumatique, au moyen du *cryophore* de Wollaston (*fig.* 232). Deux boules A et B sont réunies par un tube deux fois recourbé; A contient de l'eau, qu'on a portée à l'ébullition avant de fermer à la lampe la pointe effilée qui termine B. L'appareil étant ainsi purgé d'air, on entoure la boule B d'un mélange réfrigérant; l'eau se vaporise et distille rapidement, de l'espace le plus chaud vers l'espace le plus froid; au bout de quelques minutes, le liquide qui reste en A se trouve entièrement congelé.

(*) Leslie a modifié cette expérience, de manière à la rendre plus frappante encore. Il taille, dans un morceau de glace, un petite capsule plate, sur laquelle il dépose un peu de mercure : cette capsule étant placée sous le récipient de la machine pneumatique, au-dessus d'une cuvette qui contient de l'acide sulfurique concentré, il fait le vide comme précédemment. L'évaporation de la glace détermine, dans ces conditions, un abaissement de température suffisant pour congeler le mercure.

315. **Appareil de M. Ed. Carré.** — On doit à M. Ed. Carré un appareil qui permet d'obtenir en quelques minutes une carafe d'eau glacée, par une simple application de l'expérience de Leslie.

Une pompe P (*fig.* 233) semblable à la pompe à main qui a été décrite précédemment (166), et dont on manœuvre la tige au moyen du levier L, communique avec un tube S à l'extrémité duquel on adapte, au moyen

Fig. 233. — Appareil de Ed. Carré, pour la production de la glace.

d'un bouchon de caoutchouc, la carafe A qui contient l'eau que l'on veut congeler. Une disposition particulière force les gaz aspirés par la pompe à traverser le cylindre B qui contient de l'acide sulfurique concentré, destiné à absorber la vapeur d'eau à mesure qu'elle se produit. — On fait d'abord le vide aussi complétement que le permet la pompe, et on l'entretient ensuite en donnant de temps en temps quelques coups de piston : au bout de sept à huit minutes, on voit se former à la surface du liquide des aiguilles de glace qui s'étendent rapidement, et la congélation finit par envahir la plus grande partie de la masse.

316. **Applications diverses de l'abaissement de température produit par l'évaporation.** — L'emploi des *alcarazas* est encore fondé sur la production du froid par l'évaporation. Ce sont des bouteilles de terre poreuse, qu'on emplit d'eau ; cette eau suinte à travers les pores,

et vient offrir à l'extérieur une grande surface d'évaporation. Si l'on place une de ces bouteilles dans un courant d'air, le liquide qu'elle contient se refroidit de plusieurs degrés au-dessous de la température de l'air environnant. — On rafraîchit encore notablement l'eau placée dans une carafe, en entourant celle-ci d'un linge, la plaçant sur une assiette pleine d'eau, et l'exposant dans un courant d'air. L'eau de l'assiette s'élève dans le linge, par capillarité, et l'évaporation produit un abaissement de température de plusieurs degrés.

C'est pour la même raison qu'il peut être funeste de rester quelque temps exposé à un courant d'air, surtout quand la surface de la peau est humide ; le froid produit par l'évaporation est alors d'autant plus dangereux, que la température du corps était primitivement plus élevée.

On trouvera plus loin, à propos de la liquéfaction des gaz, plusieurs applications dans lesquelles on utilise le froid produit par l'évaporation de divers liquides.

II. — ÉBULLITION.

317. **Phénomène de l'ébullition.** — Quand une masse liquide est soumise à l'action continue d'un foyer de chaleur, il arrive, au moins dans la plupart des cas, qu'on voit apparaître, à un instant déterminé, des bulles de vapeur au sein du liquide, et particulièrement au contact de certains points du vase qui le contient : ces bulles s'élèvent dans le liquide et viennent crever à sa surface. C'est le phénomène qu'on désigne sous le nom d'*ébullition*.

Si l'on prend soin de placer un thermomètre dans le liquide, et si l'on recommence plusieurs fois l'expérience dans des conditions aussi semblables que possible, on voit que l'ébullition se produit en général, pour un même liquide, lorsque le thermomètre est parvenu au même point, et que l'indication de l'instrument ne varie pas d'une manière appréciable tant que le phénomène se continue.

De là ces deux lois, analogues à celles de la fusion, et qui ont été d'abord formulées comme caractéristiques du phénomène de l'ébullition :

1° *Pour un même liquide, placé dans les mêmes conditions, l'ébullition se produit toujours à une même température.*

2° *La température demeure invariable pendant toute la durée de l'ébullition.*

Mais c'est seulement par la discussion d'expériences assez délicates qu'on a pu définir d'une manière précise quelles sont ces *conditions* dont la réunion est nécessaire pour que l'ébullition se produise toujours à une température déterminée, et à quel titre les variations de chacune d'elles

interviennent dans les modifications que peut subir le phénomène. — Ce sont ces conditions que nous allons d'abord mettre en évidence.

318. **L'ébullition d'un liquide ne peut s'effectuer à une température inférieure à celle pour laquelle la force élastique de sa vapeur est égale à la pression que supporte le liquide.** — Si l'on imagine une bulle de vapeur formée au sein d'une masse liquide, il est clair qu'elle ne pourra subsister à l'état gazeux, que si sa force élastique est au moins égale à la pression qu'elle supporte de la part du liquide qui la circonscrit. — Or, si le liquide présente une surface libre, comme c'est le cas le plus ordinaire, la pression en un point de sa masse est égale à la pression qui s'exerce sur la surface libre, augmentée de la pression due à la profondeur du point considéré au-dessous de cette surface elle-même. Par suite, les bulles de vapeur ne peuvent se produire au sein du liquide, que si leur température dépasse sensiblement la valeur pour laquelle leur force élastique atteint la pression exercée sur la surface.

Donc, pour un liquide offrant une surface libre sur laquelle s'exerce la pression atmosphérique, l'ébullition ne doit être *possible* que si la température est au moins égale à celle pour laquelle la tension de sa vapeur est d'une atmosphère. Pour un liquide dont la surface libre supporte une pression moindre qu'une atmosphère, l'ébullition doit être *possible* à une température moindre que la précédente; et si, au contraire, la pression sur la surface est supérieure à une atmosphère, l'ébullition ne doit pouvoir se produire qu'à une température plus élevée. — C'est ce que prouvent les expériences suivantes :

319. **Vérifications expérimentales.** — Lorsqu'on amène de l'eau pure à l'ébullition, dans un vase ouvert, et que la pression atmosphérique est de 760 millimètres au moment de l'expérience, un thermomètre plongé dans la masse indique que la température n'est jamais inférieure à 100°, température à laquelle l'expérience nous a montré que la tension de la vapeur d'eau est de 1 atmosphère (294). Il arrive même souvent que la température du liquide est un peu supérieure à 100°.

Si maintenant on place de l'eau tiède sous le récipient de la machine pneumatique, et qu'on raréfie progressivement l'air qui presse sur sa surface libre, on constate que l'ébullition peut se produire à une température d'autant plus basse que la pression est moindre. — Un manomètre adapté au récipient indique toujours une pression à peu près égale à la tension de la vapeur pour la température actuelle du liquide. — Enfin, dans cette expérience, l'ébullition s'arrête rapidement si l'on cesse de faire fonctionner la machine, parce que la vapeur dégagée vient accroître la pression du gaz qui est resté dans le récipient.

Une expérience facile à réaliser, et qui est due à Franklin, conduit aux mêmes conclusions. — On introduit de l'eau dans un matras de verre B, et on l'y fait bouillir vivement pendant quelques minutes. La vapeur en-

traîne avec elle l'air intérieur; on bouche alors le matras et on le retourne, comme l'indique la figure 234. Le liquide cesse d'abord de bouillir; mais, la surface libre ne supportant d'autre pression que celle de la vapeur, on peut déterminer de nouveau l'ébullition en versant sur le ballon de l'eau froide, qui détermine une condensation partielle de la vapeur, et, par suite, une diminution de la pression supportée par le liquide. L'expérience peut être prolongée pendant fort longtemps, si le ballon a été bien purgé d'air. On a soin, en général, pour éviter que l'air ne rentre par les pores du bouchon, de faire plonger l'extrémité du col dans un vase V contenant de l'eau.

Fig. 234.

320. **Marmite de Papin.** — La marmite de Papin est un appareil complétement clos et à parois très-résistantes dans lequel, conformément à ce qui précède, on peut amener l'eau à des températures très-élevées sans que l'ébullition se produise. — Un cylindre de bronze C (*fig.* 235), contenant de l'eau, est fermé par un couvercle que maintient la vis V; ce couvercle est muni d'une *soupape de sûreté*, consistant en une petite ouverture *s*, sur laquelle s'appuie un levier L maintenu à l'une de ses extrémités et chargé à l'autre d'un poids P; ce poids est réglé de façon que le levier se soulève et laisse échapper la vapeur, lorsqu'elle atteint une pression de 8 à 10 atmosphères, afin d'éviter les explosions. Si l'on chauffe l'eau renfermée dans cet appareil, la force élastique de la vapeur qui se forme à la surface exerce bientôt sur le liquide une pression égale à la force élastique des bulles qui tendent à prendre naissance au sein de la masse; l'ébullition est donc impossible. — L'ébullition se produit brusquement dès qu'on ouvre la soupape, en soulevant le levier; la vapeur s'échappe alors avec impétuosité, sous la forme d'un jet de plusieurs mètres de hauteur.

* 321. **Expériences de Cagniard de Latour.** — On doit à Cagniard de Latour des expériences établissant que, si l'on élève de plus en plus la température d'un liquide enfermé dans un vase hermétiquement clos, il arrive cependant un moment où ce liquide se réduit tout entier en va-

peur, mais sans entrer en ébullition. — Ce phénomène de *vaporisation totale* peut se produire même dans un vase dont la capacité ne serait pas égale à plus de deux ou trois fois le volume initial du liquide.

Fig. 235. — Marmite de Papin.

En opérant dans des tubes de verre très-résistants, Cagniard de Latour a reconnu que la température de *vaporisation totale* est de 200° pour l'éther sulfurique et de 259° pour l'alcool. D'après les expériences de M. Drion, l'éther chlorhydrique manifeste à 184° le phénomène de la vaporisation totale; l'acide sulfureux, à 157°.

322. **L'ébullition ne se produit qu'avec une extrême difficulté dans les points d'une masse liquide qui ne sont en contact qu'avec des corps solides, sans interposition de gaz. — Expérience de M. Donny.** — D'après ce qu'on vient de voir, il faut, pour que l'ébullition d'un liquide puisse se produire, que sa température atteigne une valeur déterminée (318). Mais il ne résulte nullement de là que cette condition nécessaire soit toujours suffisante, et qu'un liquide doive toujours entrer en ébullition lorsque sa température atteint cette valeur. — Un certain nombre d'expériences prouvent, comme on va le voir, qu'il peut en être tout autrement.

M. Donny (de Gand), prend un tube de verre à parois très-résistantes; après lui avoir donné plusieurs courbures, comme l'indique la figure 236, il le ferme à l'une de ses extrémités A et soude à l'autre extrémité B plusieurs boules séparées les unes des autres par des orifices assez étroits, la dernière étant terminée par une pointe effilée *m*. Le tube ayant été lavé plusieurs fois à l'alcool et à l'éther, pour en enlever les matières grasses, puis à l'acide sulfurique concentré, il y introduit de l'eau distillée : alors, redressant l'appareil, la pointe *m* en haut, il fait bouillir longtemps; il ferme la pointe, pendant que la vapeur se dégage, et enfin il laisse refroidir l'appareil. — Grâce à ces précautions successives, on voit : 1° que le liquide peut mouiller le verre, c'est-à-dire être en contact intime avec lui, sans interposition de bulles d'air; 2° que l'air dissous dans l'eau a été chassé par une ébullition prolongée; 3° que, à la température ordinaire, la pression qui s'exerce sur la surface libre du liquide doit être très-faible, puisque l'air a été chassé du tube par la vapeur, et que celle-ci en se refroidissant a subi une condensation presque complète et ne conserve plus qu'une tension de quelques millimètres.

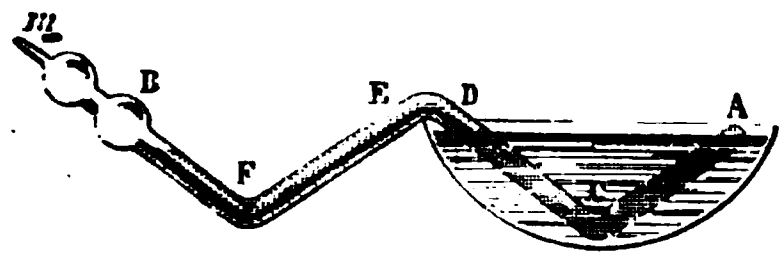


Fig. 236. — Expérience de M. Donny.

L'appareil étant ainsi préparé et froid, on plonge la courbure C dans une solution de chlorure de calcium, et l'on chauffe progressivement : grâce au sens des courbures du tube, le liquide échauffé dans la partie ACD ne tend pas à se mélanger avec celui de la partie EFB, en sorte que la pression exercée en B et transmise dans le liquide conserve toujours une valeur très-faible : de là résulte que, si l'on n'avait égard qu'à la condition précédemment énoncée, il semble que l'ébullition devrait se produire à une température très-basse, comme dans l'expérience de Franklin (*fig.* 234). M. Donny a constaté, au contraire, qu'on peut amener la température du bain jusque vers 135°, sans qu'il ait ébullition. Alors seulement, il se produit tout à coup, en l'un des points du liquide, une bulle volumineuse de vapeur, soulevant toute la colonne et la projetant dans les boules, qui ont précisément pour effet d'amortir le choc.

Cette expérience fournit invariablement les mêmes résultats, avec tous les tubes bien préparés; elle conduit à la conclusion suivante : si un liquide n'est en contact qu'avec un corps solide et avec lui-même, et qu'il ne puisse se trouver aucun gaz étranger, soit entre lui et le corps solide, soit au milieu du liquide, il ne suffit nullement, pour qu'il y ait ébullition, que sa température atteigne la valeur pour laquelle la tension de la vapeur serait égale à la pression exercée sur le liquide. Dans l'expérience qui précède, la tension de la vapeur correspondante à 135° est d'environ 2300 millimètres, tandis que le liquide supporte une pression qui est

peut-être de 15 à 20 millimètres : la tension de la vapeur serait donc plus de cent fois égale à celle qui est rigoureusement nécessaire pour que le dégagement ait lieu. — Nous allons arriver à une conséquence semblable dans d'autres conditions un peu différentes.

323. **L'ébullition ne se produit encore qu'avec une grande difficulté dans une masse liquide qui est en contact par toute sa surface avec un autre liquide. — Expérience de M. Dufour.** — M. Louis Dufour a eu l'idée d'appliquer à l'étude de la production des vapeurs le procédé que nous avons signalé plus haut, comme ayant conduit à des résultats remarquables sur les phénomènes de surfusion (279). — En introduisant des gouttes d'eau, par exemple, au sein d'un mélange d'huile de lin et d'essence de girofle dans des proportions convenables, on obtient de petites sphères d'eau qui se tiennent en équilibre au milieu du liquide qui les environne, sans se mélanger avec lui. On constate alors qu'on peut élever leur température jusqu'à 178° sans qu'il y ait ébullition. Or, à une pareille température, la tension de la vapeur d'eau est voisine de 9 atmosphères. On voit donc que ces gouttes liquides, en contact avec un autre milieu liquide par tous les points de leur surface, parviennent, sans entrer en ébullition, à une température telle, que la tension de leur vapeur serait presque dix fois égale à celle qui est rigoureusement nécessaire pour que le dégagement de cette vapeur ait lieu.

L'expérience étant réalisée dans ces conditions, si l'on vient à toucher l'une de ces gouttes d'eau avec une baguette de verre ou de bois, l'ébullition s'y produit avec une extrême vivacité, et la goutte est projetée à une grande distance du corps solide — C'est là un fait dont nous donnerons l'explication un peu plus loin (326).

324. **Influence déterminante de la présence d'un gaz, au sein de la masse liquide, sur le phénomène de l'ébullition. — Expérience de M. Dufour.** — Lorsqu'un liquide, en contact seulement avec un corps solide ou avec un autre liquide, est amené, comme nous venons de l'indiquer, à une température supérieure à celle qui donnerait à sa vapeur une tension capable de vaincre la pression extérieure, l'expérience montre que la présence d'un gaz quelconque en un point de la masse liquide détermine l'ébullition en ce point.

C'est ce qu'il est facile de constater au moyen d'une disposition due à M. L. Dufour. — Une cornue (*fig.* 237), bien lavée à l'acide et contenant de l'eau jusqu'à moitié, est mise en communication avec un ballon B, qui communique lui-même avec un manomètre M comme celui de la figure 228, et avec une machine pneumatique par l'intermédiaire du tube T. La cornue porte une large tubulure, dans laquelle sont assujettis : 1° un tube de dégagement muni d'un robinet *r*, 2° un thermomètre *a* donnant la température du liquide, 3° deux fils de platine *f*, *f'*, qui plongent également dans le liquide. — On fait bouillir d'abord, pendant un certain temps, l'eau

de la cornue, de manière à en dégager aussi complétement que possible l'air dissous ou adhérent aux parois : pendant cette ébullition, le robinet *r* est ouvert pour servir au dégagement de la vapeur. Lorsqu'elle a duré quelque temps, on ferme *r*, et on laisse refroidir l'appareil. Alors

M

Fig. 237. — Expérience de M. Dufour.

les robinets S et *s* étant ouverts, la machine pneumatique permettant d'établir dans l'appareil telle pression que l'on veut, pression mesurée d'ailleurs par le manomètre, et un fourneau à gaz permettant de régler également à volonté la température, on constate que l'on peut, sans obtenir d'ébullition, amener l'eau à une température qui dépasse de plusieurs degrés celle où la tension de sa vapeur serait égale à la pression intérieure; il est même possible de la maintenir dans ces conditions pendant un temps presque indéfini. — L'expérience étant ainsi disposée, on met en communication les fils *f* et *f'* avec les pôles d'une pile, de manière à faire passer le courant dans l'eau et à produire un dégagement gazeux sur les fils : aussitôt, l'ébullition se produit avec une vivacité telle, qu'une partie du liquide est ordinairement projetée dans le ballon B.

325. **Conséquences des faits qui précèdent, concernant les conditions du phénomène de l'ébullition.** — En résumé, l'expérience montre donc : 1° que, sous une pression déterminée, un liquide ne peut bouillir que si la vapeur atteint une température déterminée; 2° que cette condition nécessaire n'est pas suffisante, si le liquide n'est en contact qu'avec un corps solide ou liquide; c'est-à-dire que les bulles de vapeur, qui auraient la tension nécessaire pour se dégager si elles pouvaient se former, ne se forment point dans ces conditions; 3° que la présence d'un gaz au milieu du liquide détermine l'ébullition, pourvu que la température ait la valeur qui vient d'être indiquée.

On voit donc que des bulles gazeuses, introduites en certains points d'une masse liquide, doivent être considérées comme constituant chacune,

en réalité, une sorte d'*atmosphère intérieure* dans laquelle la vapeur peut se répandre, comme elle se répand dans l'atmosphère qui surmonte la masse liquide tout entière, et sans laquelle elle se produit très-difficilement au milieu du liquide; si la température a une valeur convenable, le volume de ces bulles va toujours croissant, par l'addition incessante de nouvelles quantités de vapeur; cette vapeur étant d'ailleurs douée d'une force élastique suffisante pour demeurer gazeuse au sein de la masse, il arrive un moment où les bulles s'élèvent dans le liquide, et l'ébullition a lieu.

L'ébullition est donc un dégagement gazeux qui se compose à la fois du gaz auparavant contenu dans la masse liquide, et d'une masse assez considérable de vapeur qui a pu se répandre dans les bulles gazeuses, avant leur ascension dans le liquide et pendant cette ascension elle-même, par un phénomène analogue à l'évaporation. — Nous allons montrer que toutes les particularités de l'ébullition, lorsqu'elle s'effectue dans les conditions ordinaires, sont d'accord avec cette façon d'envisager le phénomène.

326. **Ébullition dans les circonstances les plus ordinaires.** — Lorsqu'on fait bouillir un liquide, de l'eau, par exemple, dans un vase quelconque, les bulles d'air dissous que la chaleur dégage, et surtout celles qui restent interposées entre les parois du vase et le liquide qui ne mouille qu'incomplétement ces parois, suffisent pour permettre le dégagement de la vapeur, dès que la température est assez élevée; en sorte que, dans la plupart des cas, l'ébullition commence à une température qui est presque exactement celle où la tension de la vapeur est égale à la pression supportée par le liquide. — On voit d'ailleurs les bulles de vapeur se former en certains points de la paroi exclusivement : ce sont les points auxquels, la paroi n'étant pas mouillée par le liquide, il a pu rester de l'air attaché. — Enfin, on conçoit sans peine comment, le départ d'une bulle laissant toujours après elle une partie du mélange gazeux adhérent à la paroi, les mêmes phénomènes peuvent continuer à se produire, et les bulles nouvelles continuent à partir des mêmes points.

L'expérience montre cependant que l'ébullition, lorsqu'elle a duré un certain temps, devient de plus en plus difficile : qu'elle se fait par soubresauts, et que la température du liquide s'élève. Ce résultat s'explique, en remarquant qu'une longue ébullition chasse successivement les gaz en dissolution et ceux qui étaient restés adhérents à la paroi. — On avait également remarqué que l'eau n'entre en ébullition qu'à 106 ou 108 degrés dans les vases de verre dont la surface interne a été lavée aux acides : cette particularité tient évidemment à ce que ces lavages ont rendu la paroi capable d'être mouillée par l'eau.

On répète ordinairement dans les cours l'expérience suivante, qui est due à Gay-Lussac. — On fait bouillir de l'eau dans un ballon de verre, et, quand l'ébullition a duré quelque temps, on retire le ballon du feu : l'é-

bullition cesse, bien que la température du liquide soit en général de 101 ou 102 degrés. On projette alors dans le ballon un peu de limaille de cuivre ou de limaille de fer, et l'on voit un vif dégagement de bulles se produire au contact de cette limaille ; c'est évidemment l'air entraîné au sein du liquide, par la limaille elle-même, qui détermine la formation d'une quantité considérable de vapeur, la température ayant d'ailleurs une valeur suffisante pour que la vapeur produite puisse se dégager.

On conçoit enfin l'influence que doit avoir, dans les expériences de M. Dufour que nous avons citées (323), le contact d'un corps solide avec les sphères liquides portées à une haute température : le corps solide apporte toujours à la surface de ces sphères une certaine quantité d'air qui lui est restée adhérente, et qui fournit à la vapeur l'atmosphère gazeuse favorable à sa formation.

327. **Ébullition de l'acide sulfurique et des liquides visqueux.** — Lorsqu'on fait bouillir, en les chauffant par la partie inférieure, certains liquides visqueux, comme l'acide sulfurique, les bulles qui se forment sur les parois ne parviennent à diviser la masse que lorsqu'elles ont atteint un volume assez considérable ; à ce moment, le liquide tout entier est soulevé, et avec lui le vase qui le contient : il se produit alors un violent *soubresaut*, qui peut déterminer la rupture du vase, quand celui-ci retombe sur ses supports. — Si l'on observe attentivement un thermomètre plongeant dans un semblable liquide, on le voit monter depuis le moment où une bulle vient de se dégager jusqu'au moment où la suivante se dégage, après quoi la température redescend brusquement, et ainsi de suite.

Ces particularités, dont l'explication est évidente d'après ce qui précède, rendent la distillation de ce genre de liquides assez difficile : pour faciliter l'opération, on place la cornue *c* qui contient l'acide (*fig.* 258)

Fig. 258. — Distillation de l'acide sulfurique.

au centre d'une grille annulaire *g*, de manière à chauffer le liquide près de sa surface. On place, en outre, dans la cornue, des fils de platine le long desquels on voit les bulles de vapeur se former. Enfin, pour empê-

cher que la condensation se fasse dans la région *c* et qu'une partie du liquide retombe sans passer dans le récipient *b*, on place au-dessus de la grille une sorte de dôme en tôle *d*, dans lequel est ménagée une échancrure pour laisser passer le col de la cornue.

328. **Ébullition des solutions salines.** — La présence des matières salines en dissolution dans un liquide élève en général la température d'ébullition. Pour l'eau, en particulier, cette influence est d'autant plus considérable que la quantité de sel dissoute est plus grande : les écarts diffèrent, en valeur absolue, d'un sel à l'autre. — Le tableau suivant indique les températures d'ébullition de quelques solutions de sels dans l'eau, chacune d'elles étant supposée *saturée :* les nombres correspondent donc, en réalité, à des quantités différentes des divers sels.

POINTS D'ÉBULLITION DE QUELQUES SOLUTIONS SATURÉES.

NOMS DES SOLUTIONS.	POINTS D'ÉBULLITION.
Carbonate de soude.	114°,6
Chlorure de sodium.	108,4
Sel ammoniac.	114,2
Nitrate de potasse.	115,9
Nitrate de soude.	121,0
Carbonate de potasse.	135,0
Nitrate de chaux.	151,0
Chlorure de calcium.	179,5

329. **Ébullition des mélanges de plusieurs liquides inégalement volatils.** — Lorsqu'on fait bouillir un mélange de deux liquides A et B, dont l'un A est plus volatil que l'autre, la température à laquelle l'ébullition commence est toujours *supérieure au point d'ébullition du plus volatil* A : elle la surpasse d'autant plus que l'autre liquide B se trouve en plus forte proportion dans le mélange. Les premières portions de vapeur qui se dégagent sont presque exclusivement formées aux dépens du liquide A ; puis, la proportion de celui-ci diminuant sans cesse dans le résidu, la température d'ébullition s'élève par degrés, en même temps que la vapeur du liquide B se forme en plus grande abondance. Enfin, quand tout le liquide A s'est volatilisé, la température atteint définitivement le point d'ébullition de B, et elle demeure constante jusqu'à la fin de l'opération.

330. **Détermination expérimentale du point d'ébullition normal d'un liquide.** — D'après ce qui précède, il faut entendre par *point d'ébullition* d'un liquide sous une pression déterminée la température *minima* à laquelle ce liquide puisse bouillir sous cette pression. — Nous désignerons en particulier par *point d'ébullition normal* la température *minima* à laquelle l'ébullition puisse avoir lieu sous la pression de 760 millimètres.

Or, si l'on voulait déterminer cette température en plaçant un thermo-

mètre dans le liquide lui-même, il est clair qu'on aurait toujours à craindre l'influence, soit d'une expulsion plus ou moins complète des gaz, soit de l'adhérence entre le liquide et les parois, soit de la présence des sels en dissolution, et en général des diverses causes du phénomène que l'on désigne quelquefois sous le nom général de *retard du point d'ébullition*. — Mais, puisque cette température minima est celle à laquelle la tension de la vapeur est égale à la pression extérieure, ce doit être celle de la vapeur lorsqu'elle parvient dans l'atmosphère elle-même. L'expérience montre, en effet, qu'un thermomètre placé *dans la vapeur, à une petite distance de la surface d'un liquide en ébullition*, indique une température constante, sous une pression déterminée. C'est donc dans ces conditions qu'on doit se placer toujours pour déterminer le point d'ébullition normal d'un liquide.

Pour l'eau en particulier, en opérant comme il vient d'être dit, on constate que le thermomètre marque toujours, sous la même pression atmosphérique, la même température, quelle que soit la nature du vase, la pureté de l'eau ou la durée de l'ébullition. C'est là ce qui explique la nécessité des dispositions qui ont été indiquées plus haut pour la détermination du point fixe supérieur du thermomètre centigrade (204).

Le tableau suivant donne les points d'ébullition de quelques liquides, sous la pression de 760 millimètres.

POINTS D'ÉBULLITION DE DIVERS LIQUIDES.

NOMS DES LIQUIDES.	POINTS D'ÉBULLITION.	NOMS DES LIQUIDES.	POINTS D'ÉBULLITION.
Acide nitrique monohydraté.	86°	Eau	100°
— nitrique ordinaire	125	Essence de térébenthine	161
— sulfureux	— 8	Éther chlorhydrique	11
— sulfurique	326	— nitreux	21
Alcool absolu	78,5	— sulfurique	35,5
— méthylique(esp.de bois)	63	Mercure	360
Benzine	80	Soufre	400
Chloroforme	63,5	Sulfure de carbone	48

331. **Chaleur latente de vaporisation.** — La constance de la température, pendant toute la durée de l'ébullition d'un liquide, lorsque cette ébullition s'effectue au voisinage du point d'ébullition normal, conduit à une conclusion semblable à celle qui a été énoncée relativement à la fusion (274).

En effet, la température restant invariable pendant tout le temps que met le liquide à se transformer en vapeur, toute la chaleur qui lui vient de la source est employée uniquement à produire son changement d'état, *sans élever sa température*. Ici encore, on dit que cette chaleur devient *latente* ; on la désigne sous le nom de *chaleur latente de vaporisation*. — La même idée s'exprimerait d'une manière plus précise en disant que, à

égalité de température, le liquide contient moins de chaleur que la vapeur dans laquelle il se transforme.

Cette différence est rendue manifeste par la comparaison des résultats obtenus dans les expériences suivantes :

Lorsqu'on mêle 1 kilogramme d'eau à 0° et 1 kilogramme d'*eau bouillante* à 100°, le mélange prend la température de 50°. — Si l'on dirige dans 1 kilogramme d'eau à 0°, un jet de *vapeur d'eau bouillante* qui s'y condense, on reconnaît qu'il suffit de 85 grammes environ de cette vapeur pour élever la température de l'eau jusqu'à 50°. — Ainsi, 85 grammes de vapeur à 100° ont dégagé, en se condensant et se refroidissant ensuite jusqu'à la température de 50°, autant de chaleur que 1000 grammes d'eau en ont abandonné lorsqu'ils se sont refroidis depuis 100 jusqu'à 50°.

III. — CALÉFACTION.

532. **Phénomènes de caléfaction.** — On sait, par une expérience vulgaire, que lorsqu'on projette quelques gouttes d'eau ou de tout autre liquide volatil sur une plaque métallique chauffée au rouge, ce liquide prend une forme globulaire ; il est animé de mouvements giratoires très-rapides, et ne se vaporise qu'assez lentement. — Cet ensemble de caractères, assez anormal au premier abord, a été désigné, avant qu'on s'en fût rendu un compte exact, sous le nom de *caléfaction*.

Pour porter rapidement les plaques métalliques à une haute température, il est commode d'employer l'*éolipyle* représenté par la figure 239. — CC est une petite chaudière annulaire, contenant de l'alcool, que l'on chauffe avec une lampe placée au-dessous ; la vapeur inflammable qui s'y forme s'échappe en un jet très-vif, par l'orifice *o* du tube recourbé *mno*, prend feu au contact de la flamme de la lampe et vient échauffer la capsule métallique BB'.

Fig. 239. — Caléfaction.

Suivant M Boutigny, la température minima que doit atteindre la plaque métallique, pour déterminer la caléfaction de l'eau, est de 171 degrés ; pour l'alcool, 134 degrés ; pour l'éther, 64 degrés. — Si la tempé-

rature est un peu inférieure, il y a conversion brusque du liquide en vapeur : si, par exemple, après avoir placé quelques gouttes d'eau sur la capsule, celle-ci étant assez chaude pour qu'il y ait caléfaction, on vient ensuite à éteindre la lampe et à laisser refroidir l'appareil, on voit bientôt le globule s'étaler tout à coup et se réduire instantanément en vapeur.

333. **Il n'y a pas contact entre le liquide caléfié et la surface solide.** — En employant une capsule percée de trous d'un diamètre assez grand pour laisser passer le liquide à froid, on observe que le liquide caléfié ne traverse pas ces ouvertures, ce qui prouve qu'il n'en touche pas les parois. — On arrive à la même conclusion, en caléfiant de l'acide nitrique dans une capsule de cuivre ou d'argent ; ces métaux ne sont pas attaqués par l'acide, aussi longtemps qu'il est à l'état sphéroïdal. — On peut démontrer encore qu'il n'y a pas contact entre le liquide et la surface incandescente, en plongeant dans un vase de verre plein d'eau une sphère de platine chauffée à blanc et suspendue à un fil de même métal : on aperçoit alors, tout autour de la sphère, un intervalle vide dont l'épaisseur est encore exagérée pour l'œil par le grossissement que produit la convexité du vase.

Lorsque le doigt est mouillé avec de l'alcool ou de l'éther, on peut le tremper dans une masse de plomb fondu, sans éprouver autre chose qu'une sensation de fraîcheur ; on peut même, avec la main humide, couper impunément un jet de fonte en fusion, à sa sortie d'un haut fourneau. — Ces expériences, indiquées par M. Boutigny, avaient été, antérieurement déjà, exploitées par les jongleurs. En 1811, un Espagnol parcourut toute l'Europe en montrant, aux spectateurs attirés par ses expériences, qu'il pouvait sans danger faire couler sur ses bras des jets de fonte ou de plomb fondu ; Wollaston, témoin de ces phénomènes, les avait expliqués en admettant que les corps échauffés au delà d'une certaine limite ne touchent plus les liquides.

334. **Le liquide caléfié est à une température inférieure à son point normal d'ébullition.** — Cette particularité essentielle peut être constatée facilement en plaçant dans un globule liquide caléfié, soit la boule d'un petit thermomètre, soit la soudure d'une aiguille thermo-électrique, comme l'a fait M. Boutan (*). — On constate que la température de l'eau, celle de l'éther, celle de l'alcool, sont inférieures chacune au point d'ébullition normal du liquide.

Il résulte de là que, si l'on caléfie l'un de ces liquides qu'on obtient en condensant un gaz par un abaissement de température considérable, de l'acide sulfureux, par exemple, la température du globule liquide est inférieure à celle de la condensation. — Sur une capsule ou dans un creuset d'argent porté au rouge, on répand une certaine quantité d'acide

(*) Voir à la fin du chapitre relatif aux courants thermo-électriques.

sulfureux liquide, qui se caléfie ; on verse alors au-dessus quelques gouttes d'eau : cette eau se transforme immédiatement en glace. C'est ce que l'on conçoit facilement si l'on remarque que l'acide sulfureux bout à — 8°, et que, par suite, il conserve en se caléfiant une température un peu inférieure : l'eau qui est mise en contact avec ce liquide peut donc être refroidie suffisamment pour se congeler.

M. Boutigny a eu le premier l'idée de rendre cette expérience plus frappante, en l'exécutant sur une capsule placée dans le moufle d'un four de coupellation, à côté d'un creuset contenant de l'argent en fusion.

Faraday, en remplaçant l'acide sulfureux par de l'acide carbonique liquide, est parvenu, par le même procédé, à congeler le mercure dans un creuset rouge.

335. **Interprétation des diverses particularités du phénomène.** — Le phénomène de la caléfaction, considéré d'abord comme presque paradoxal, et attribué alors par M. Boutigny à un état particulier du liquide qu'il avait nommé *état sphéroïdal*, peut s'expliquer aisément aujourd'hui jusque dans ses détails.

La surface solide étant à une température où la vapeur du liquide possède une tension très-considérable, il se forme, entre le solide et le liquide, une couche de vapeur qui maintient entre eux une distance sensible. Dans ces conditions, le liquide doit prendre une forme plus ou moins sphéroïdale, comme le fait le mercure sur un plan de verre qu'il ne peut pas mouiller. — Enfin, puisque le liquide ne touche pas la surface incandescente, la chaleur ne se transmet du solide au liquide que par rayonnement : dès lors, c'est la surface du globule qui reçoit et absorbe la plus grande partie de la chaleur; c'est la surface qui émet incessamment la vapeur, sans qu'il puisse y avoir ébullition dans l'intérieur du globule.

On conçoit d'ailleurs que, si la température de la surface solide s'abaisse, de manière que la couche de vapeur interposée ne puisse plus maintenir le globule à distance, il y a contact entre la surface solide et le liquide, à un moment où la surface solide est encore à une température très-supérieure au point d'ébullition normal du liquide : de là une vive ébullition, et souvent même projection d'une partie du liquide.

Fig. 240.

336. **Intervention possible de ces phénomènes dans certaines explosions des chaudières à vapeur.** — L'expérience suivante,

due à M. Boutigny, paraît indiquer comment il peut arriver que l'explosion d'une chaudière à vapeur se produise au moment où sa température s'abaisse, ainsi que l'expérience l'a quelquefois montré. — A (*fig.* 240) est une petite chaudière de cuivre, dont on chauffe la partie inférieure jusqu'à une température voisine du rouge, en la plaçant au-dessus d'une lampe L; on y projette alors un peu d'eau, et l'on ferme l'ouverture avec un bon bouchon. L'eau se caléfie d'abord au fond de la chaudière; mais, si l'on éloigne l'appareil de la flamme, comme le représente la figure, et qu'on le laisse refroidir pendant quelques instants, il arrive un moment où le liquide se réduit brusquement en vapeur. Le bouchon est alors vivement projeté.

Dans les chaudières des machines à vapeur, lorsqu'on les alimente avec des eaux chargées de sels calcaires, il se forme souvent des dépôts assez épais et peu conducteurs de la chaleur; pour obtenir une quantité suffisante de vapeur, il faut alors chauffer les parois métalliques jusqu'à les faire rougir. Si, à ce moment, le dépôt terreux vient à se détacher, l'eau, en rencontrant les parois incandescentes, doit éprouver d'abord la caléfaction; puis, quand la température s'abaisse, cette eau donne brusquement naissance à une quantité de vapeur qui peut déterminer l'explosion de la chaudière.

IV. — CONDENSATION DES VAPEURS ET DES GAZ.

337. **Condensation des vapeurs.** — Il nous reste, pour terminer ce qui se rapporte aux changements d'état des corps, à étudier le retour de l'état gazeux à l'état liquide, c'est-à-dire la *condensation* des vapeurs et des gaz.

Les vapeurs diffèrent des gaz proprement dits en ce qu'elles sont plus voisines de leurs points de liquéfaction. Si même on réserve exclusivement, comme on le fait d'ordinaire, le nom de *vapeurs* aux fluides élastiques provenant de la vaporisation des substances qui sont solides ou liquides aux températures et sous les pressions habituelles de l'atmosphère, il est clair qu'il suffira, pour condenser toutes les vapeurs, de les faire rendre dans des appareils environnés d'eau froide, et disposés de manière à recueillir le liquide obtenu. — Nous décrirons un peu plus loin, à propos de la distillation, les appareils condenseurs le plus fréquemment employés.

338. **Condensation des gaz.** — La condensation des gaz proprement dits exige des moyens plus énergiques. — Deux procédés généraux, le refroidissement et la compression, ont été mis en usage, soit séparément, soit simultanément; tous deux ont pour effet d'amener le gaz sur lequel on opère à un point de plus en plus voisin de la saturation de l'espace qu'il occupe; la saturation une fois atteinte, chaque nouvel abais-

sement de température ou accroissement de pression doit déterminer la précipitation d'une partie du gaz à l'état liquide.

339. **Condensation des gaz par simple refroidissement.** — Le premier gaz qui ait été liquéfié est l'acide sulfureux ; il fut obtenu liquide par Monge et Clouet, vers la fin du dix-huitième siècle. — Dans les laboratoires, on fait passer l'acide sulfureux, au sortir du ballon A (*fig.* 241)

Fig. 241. — Liquéfaction de l'acide sulfureux.

où il se produit, dans une éprouvette *b* entourée de glace et destinée à condenser l'eau et les impuretés entraînées par le gaz, puis dans un tube horizontal *c* renfermant du chlorure de calcium qui achève de le dessécher, et enfin dans un petit ballon entouré d'un mélange de glace et de sel marin, où le gaz vient se liquéfier. — Si l'on veut conserver l'acide sulfureux à l'état liquide, on le verse dans un tube de verre (*fig.* 242), fermé à la partie inférieure et étranglé vers le milieu ; on plonge un instant ce tube dans le mélange réfrigérant, puis on le fond au chalumeau en *a*, et on enlève la partie supérieure. L'acide sulfureux liquide peut ainsi être conservé indéfiniment.

Fig. 242.

Le même procédé a été appliqué par Guyton de Morveau à la liquéfaction du gaz ammoniac ; mais il faut ici un mélange réfrigérant plus énergique. On emploie le mélange de neige et de chlorure de calcium (285). — Dans ces conditions, on parvient aisément aussi à liquéfier le cyanogène.

340. **Condensation des gaz par simple compression : expériences de Davy et de Faraday.** — En 1824, Davy et Faraday recoururent pour la première fois à la compression. Ils liquéfièrent plusieurs gaz, entre autres le chlore, l'ammoniaque, l'acide sulfhydrique et l'acide carbonique, en employant l'artifice suivant.

Dans l'une des branches d'un tube de verre très-résistant (*fig.* 243), celle de droite, par exemple, on a introduit les matières destinées à pro-

duire le gaz, puis on a fermé à la lampe l'autre extrémité. On chauffe les matières contenues dans le tube; le gaz, se dégageant alors dans un espace très-limité, acquiert bientôt la densité qui correspond à la saturation de cet espace; à partir de ce moment, la liquéfaction commence. — Pour séparer le liquide ainsi obtenu des substances dont il provient, il suffit de plonger la branche de gauche dans la glace; le liquide volatil, distillant de la partie la plus chaude vers la plus froide, vient s'y rassembler au bout de quelques instants.

Fig. 243. — Liquéfaction du gaz ammoniac.

341. **Appareil de Thilorier.** — En partant du même principe, Thilorier construisit et fit connaître en 1834 un appareil qui permet d'obtenir rapidement plusieurs litres d'acide carbonique liquide; la figure 244

Fig. 244. — Appareil pour la liquéfaction de l'acide carbonique.

le représente tel que M. Deleuil le construit. — Le *générateur* B et le *récipient* A sont deux cylindres de fonte, exactement semblables; le pre-

mier est représenté en coupe verticale, le second en vue perspective; chacun d'eux est renforcé extérieurement par quatre bandes longitudinales en fer forgé *d*, *d*, et par quatre cercles de fer *e*, *e*, qui les maintiennent. La capacité des cylindres est de 5 litres environ; ils se ferment à l'aide de bouchons à vis, munis de bons robinets. Un peu au-dessus de leur milieu sont disposés deux tourillons horizontaux *h*, *h*, qui permettent de les faire osciller autour d'un axe horizontal. Les deux parties de l'appareil peuvent être mises en communication au moyen d'un tube de cuivre *kig*, qui s'ajuste sur les robinets *f*, *f*.

On introduit dans le générateur B du bicarbonate de soude et l'on y suspend un tube de cuivre D, ouvert à sa partie supérieure et contenant de l'acide sulfurique; on adapte le bouchon et l'on ferme le robinet. On fait alors osciller le cylindre autour de ses tourillons: l'acide sulfurique se répand sur le bicarbonate et dégage en abondance de l'acide carbonique, qui se liquéfie par sa propre pression. Pour le faire passer dans le récipient, il suffit d'ajuster le tube de communication et d'ouvrir les robinets; l'action chimique ayant échauffé le générateur à une température supérieure à celle du récipient, le liquide distille rapidement et vient se rassembler en A. On peut recommencer l'opération une ou deux fois, et accumuler ainsi dans le récipient des quantités de plus en plus grandes d'acide carbonique liquide.

Mais il serait impossible de retirer de l'appareil le liquide obtenu. Si, en effet, on détache le générateur et le tube de cuivre, et qu'on ouvre le robinet du récipient, la pression très-élevée (50 atmosphères environ) que possède le gaz à la partie supérieure du récipient, pousse le liquide dans un tube vertical qui descend du robinet jusqu'au fond du vase, et le fait jaillir dans l'atmosphère; arrivé à l'air, l'acide carbonique s'évapore avec une extrême rapidité, empruntant à la portion qui est restée liquide la chaleur nécessaire à son changement d'état : de là un abaissement de température assez grand pour congeler la partie liquide, sous la forme d'une neige blanche. — Pour obtenir cette neige en quantité un peu considérable, on fait pénétrer le jet dans une boîte de cuivre mince (*fig.* 245), formée de deux parties A, A′ qui se réunissent à baïonnette; les deux poignées B, B′ sont enveloppées de lisière, afin qu'on puisse les tenir à la main sans éprouver une trop vive impression de froid. Le jet arrive par une tubulure latérale *s*, presque tangentiellement au contour de la boîte; il rencontre la petite lame *p*, disposée de manière à lui faire prendre un mouvement giratoire : dans ces conditions, la neige d'acide carbonique s'agglomère en une pelote légère, de la grosseur d'un œuf, tandis que le gaz excédant s'échappe dans l'atmosphère par l'intérieur des poignées.

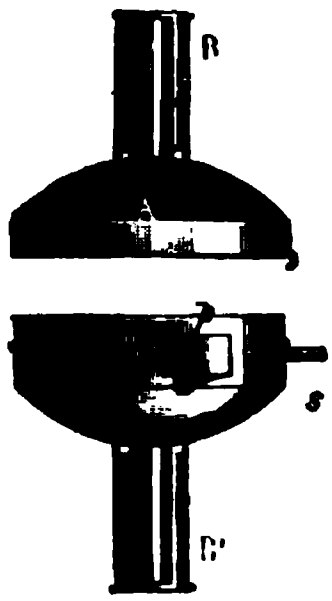


Fig. 245.

La température de l'acide carbonique solide est d'environ 77° au-dessous de 0°; si on le mélange avec de l'éther, on obtient une pâte plus homogène et plus conductrice, qui peut servir comme un puissant mélange réfrigérant. On peut même, en plaçant cette pâte sous le récipient de la machine pneumatique afin d'activer l'évaporation de l'acide carbonique, obtenir un abaissement de température qui va jusqu'à 110° au-dessous de 0°. Nous verrons, un peu plus loin, comment Faraday a utilisé ce mélange pour opérer la liquéfaction d'un grand nombre de gaz.

342. **Appareil de Natterer.** — M. Natterer a imaginé un appareil qui peut également servir à liquéfier l'acide carbonique, mais qui est plus spécialement employé pour la liquéfaction du protoxyde d'azote. Une pompe de compression puise le gaz dans un gazomètre, et le refoule dans un récipient de bronze, entouré d'un mélange réfrigérant. Lorsque, par cette compression graduellement croissante, on a liquéfié une quantité suffisante de gaz, on ferme le récipient et on le sépare du reste de l'appareil; on ouvre alors, en tournant la vis *v* (*fig.* 246), la petite tubulure qu'il porte latéralement; le protoxyde d'azote liquide s'échappe par cette issue, et peut être reçu dans un tube ouvert, où il se conserve pendant assez longtemps, à cause du froid intense que détermine son évaporation. — Ordinairement, on environne ce tube d'un flacon dont on dessèche l'air avec de l'acide sulfurique; on évite ainsi le dépôt de givre qui se produirait, à l'air libre, sur les parois du tube.

Fig. 246.

343. **Condensation des gaz par la compression et l'abaissement de température réunis. — Expériences de Faraday.** — Le travail le plus complet que l'on possède sur la liquéfaction des gaz est celui que Faraday fit paraître en 1845. L'illustre savant anglais eut l'idée d'employer les mélanges d'acide carbonique solide et d'éther pour refroidir les gaz qu'il comprimait, à l'aide de pompes foulantes, dans des tubes de verre à parois résistantes. — Nous donnons ici, sous forme de tableau, le résumé de ses recherches.

On verra que six gaz seulement n'ont encore été ni liquéfiés ni solidifiés ; d'autres ont pu être liquifiés, mais, à la température de — 110°, ils n'affectaient pas encore l'état solide ; enfin, un grand nombre ont pu être successivement liquéfiés et solidifiés.

I. — GAZ QUI N'ONT PU ÊTRE LIQUÉFIÉS.

Hydrogène.	Bioxyde d'azote.
Azote.	Oxyde de cabone.
Oxygène.	Gaz des marais.

II. — GAZ QUI ONT ÉTÉ LIQUÉFIÉS, MAIS NON SOLIDIFIÉS.

Arséniure d'hydrogène. .	Liquéfiés à — 77°, sous la pression atmosphérique.
Chlore.	
Acide chlorhydrique.. .	Liquéfiés à — 110°, sous la pression atmosphérique.
Fluorure de bore. . . .	
Fluorure de silicium. .	Liquéfiés à — 110°, sous une pression de plusieurs atmosphères.
Gaz oléfiant.	
Hydrogène phosphoré. .	

III. — GAZ QUI ONT ÉTÉ LIQUÉFIÉS ET SOLIDIFIÉS.

NOMS DES GAZ.	POINTS DE FUSION DES GAZ SOLIDIFIÉS.	
Acide iodhydrique.	— 51°	Liquéfiés à — 77°, sous la pression atmosphérique.
— bromhydrique. . . .	87	
— sulfureux.	76	
— sulfhydrique.. . . .	85	
— carbonique.	57	
Cyanogène.	34	
Ammoniaque.	75	
Acide hypochlorique. . . .	59	Liquéfiés à — 110°, sous la pression atmosphérique.
Protoxyde d'azote.	101	

344. **Emploi du froid produit par l'évaporation des gaz liquéfiés, comme moyen de réfrigération.** — En accélérant, au moyen de la machine pneumatique, l'évaporation de l'acide sulfureux liquide, on obtient un froid capable de congeler le mercure, c'est-à-dire une température inférieure à — 40°. Ce même procédé a été employé par M. Bussy pour liquéfier le gaz ammoniac.

En prenant maintenant de l'ammoniaque liquéfiée, et en activant l'évaporation par le même procédé, c'est-à-dire à l'aide d'une raréfaction active, opérée à l'aide de la machine pneumatique, MM. Loir et Drion ont pu solidifier l'acide carbonique, sous la pression de l'atmosphère. Ce corps, au lieu de se présenter sous la forme d'une neige poreuse, peut alors être obtenu en gros cristaux, de forme cubique.

345. **Appareil de M. F. Carré.** — L'absorption de chaleur qui se produit dans la vaporisation de l'ammoniaque liquéfiée a été utilisée industriellement par M. F. Carré, pour obtenir des froids assez considéra-

bles. — Voici l'un des appareils de petite dimension qui sont maintenant dans le commerce.

Un cylindre métallique A (*fig.* 247), contient une solution saturée d'ammoniaque, et communique par le tube *c* avec un récipient B. L'appareil étant bien clos, si l'on place A sur un fourneau, le gaz ammoniac qui se dégage va se liquéfier dans le récipient B : l'expérience a montré que la solution a perdu tout son gaz quand le thermomètre t marque 120°. — On retire alors le cylindre A du feu, et on le plonge dans un seau d'eau froide : l'ammoniaque qui était liquifiée en B se vaporise et vient successivement se redissoudre en A. Le froid produit en B est alors considérable : de l'eau placée au milieu du récipient se convertit rapidement en un bloc de glace. Si l'on a eu soin d'envelopper le récipient de plusieurs doubles de flanelle, on peut y maintenir pendant une heure une température de — 30°.

Fig. 247. — Production de la glace. Appareil Carré

L'appareil étant rigoureusement clos, il ne peut y avoir aucune déperdition de matière : il peut être employé indéfiniment sans qu'on ait d'autre dépense que celle du combustible ; chaque kilogramme de charbon brûlé fournit environ 3 kilogrammes de glace. — M. Carré a construit, d'après les mêmes principes, de grands appareils dans lesquels la production de glace n'est plus intermittente, mais continue.

V. — DISTILLATION.

346. Distillation. Alambic. — La distillation a pour objet de séparer une substance volatile, d'autres substances qui sont fixes ou dont la température d'ébullition est plus élevée. Les appareils qu'on emploie dans ce but sont désignés sous le nom d'*alambics*.

Le plus simple est celui qui sert à la distillation de l'eau dans les laboratoires (*fig.* 248). Il se compose de trois parties essentielles : la *chaudière* A, le *chapiteau* B et le *condenseur* C. L'eau est portée à l'ébullition dans la chaudière ; la vapeur s'élève dans le chapiteau, où elle se débarrasse des particules liquides qu'elle a pu entraîner mécaniquement, et passe de là dans le condenseur. Celui-ci est formé d'un tube EE′ enroulé en hélice, ou *serpentin*, qui est placé dans une caisse cylindrique CC′ pleine d'eau froide. La vapeur se condense dans le serpentin ; l'eau distillée s'écoule par l'orifice O et est reçue dans un vase quelconque H. — La vapeur qui se liquéfie, abandonnant au condenseur sa chaleur latente,

en élève rapidement la température ; il importe donc de renouveler sans cesse l'eau qui entoure le serpentin. A cet effet, un tube à entonnoir FF' vient s'ouvrir au fond de la caisse, et y amène d'une manière continue l'eau froide que fournit le robinet R, tandis que l'eau chaude, qui gagne

Fig 248. — Alambic ordinaire.

d'elle-même la partie supérieure, s'écoule au fur et à mesure par l'orifice *o* et le déversoir G. C'est cette eau déjà échauffée qui sert à alimenter la chaudière ; on l'introduit, selon les besoins de l'opération, par la tubulure *a*.

On voit que, durant la distillation, toutes les matières salines fixes qui peuvent être tenues en dissolution dans les eaux naturelles demeurent dans la chaudière, et que le liquide recueilli doit en être entièrement débarrassé, si l'opération a été conduite avec soin. — On peut être assuré qu'il en est ainsi, si une goutte de ce liquide ne laisse aucune trace visible quand on l'évapore sur une lame de platine.

347. **Distillation de l'eau de mer.** — Nous empruntons au *Traité de la chaleur* de M. Péclet, la description et la coupe de l'appareil de M. Freycinet, qu'on emploie pour la distillation de l'eau de mer sur les navires.

« Le vase A (*fig.* 249) est le réservoir d'eau, disposé de manière à servir de filtre. A cet effet, une toile métallique *tt*, placée à la partie supérieure, arrête les corps étrangers que l'eau entraîne avec elle, et un second tamis *t't'*, placé à la partie inférieure et plus fin que le premier, est destiné à rendre la filtration plus complète. L'eau, en sortant du vase A, se rend par le tube *dd*, muni du robinet *e*, dans le réfrigérant B pour produire

la condensation de la vapeur ; *cc* est le tube qui conduit l'eau autour de l'extrémité inférieure du serpentin *ss*, afin de rendre le refroidissement méthodique ; C est la chaudière de distillation, d'où la vapeur s'échappe par le conduit *bb* pour se rendre au serpentin. Sur le fond de la chaudière, on a fixé une cloison spirale que l'eau parcourt du centre à la circonférence. Cette cloison est maintenue à la partie supérieure par une plaque hori-

Fig. 249. — Distillation de l'eau de mer.

zontale percée de trous et destinée à empêcher l'eau d'être lancée dans le tuyau à vapeur par des mouvements brusques du navire. L'alimentation se fait avec l'eau du condenseur ; cette eau se rend par le tube *gg* dans la caisse *ii* placée sous le cendrier ; elle est conduite de là au centre de la chaudière par le tube *aa*, qui se recourbe à une hauteur moindre que celle de l'eau dans la colonne *cc*. La cheminée est formée d'une double enveloppe de tôle, remplie de sable, pour préserver des incendies ; *r*, robinet d'écoulement de l'eau distillée ; *f*, robinet qui sert à faire écouler l'eau de la chaudière quand elle a atteint le degré de concentration qu'il n'est pas bon de dépasser. »

348. **Rectification de l'alcool et de l'éther dans les laboratoires.** — Quand il s'agit de séparer des liquides inégalement volatils, on profite souvent de la propriété que possède l'un des liquides de former un composé fixe avec une matière convenablement choisie, qu'on ajoute au mélange. — C'est ce qu'on fait, par exemple, lorsque l'on se propose de *rectifier* l'alcool du commerce, pour le transformer en *alcool absolu*. Après l'avoir laissé, pendant un ou deux jours, en contact avec de la chaux vive qui lui enlève déjà par affinité chimique la plus grande partie de l'eau qu'il contient, on l'introduit dans l'alambic (*fig.* 248) avec de la chaux nouvelle, et l'on distille, en maintenant la température aussi basse que possible. La chaux retient alors la presque totalité de l'eau, et une deuxième distillation, semblable à la précédente, fournit enfin l'alcool tout à fait anhydre.

On purifie d'une manière analogue l'éther du commerce, qui contient toujours un peu d'alcool et un peu d'eau. Ces deux substances peuvent l'une et l'autre former avec le chlorure de calcium anhydre une combinaison qui est fixe à la température d'ébullition de l'éther. On introduit l'éther impur dans un ballon *a* (*fig.* 250) qui communique, par un tube

Fig. 250.

incliné entouré d'un manchon *b*, avec un flacon de verre. On fait bouillir l'éther : un courant d'eau froide circule dans le manchon ; cette eau s'introduit à la partie inférieure par un tube à entonnoir, tandis que l'eau chaude s'écoule à la partie supérieure par un tube de déversement. Les vapeurs d'éther se condensent dans la partie du tube qui est environnée d'eau froide, et le liquide distillé se rassemble dans le ballon.

Quand le liquide que l'on veut distiller bout à une température très-notablement supérieure à celle de l'atmosphère, on peut supprimer le

Fig. 251.

manchon, et faire usage d'une cornue *b* (*fig.* 251) qui s'engage dans le col d'un ballon *c* placé dans l'eau froide.

349. **Distillations fractionnées.** — On peut souvent séparer par distillation plusieurs liquides mélangés, en mettant simplement à profit la différence entre leurs points d'ébullition. On opère alors par *fractionnement des liqueurs*, c'est-à-dire qu'on recueille à part les portions qui distillent au voisinage de chaque point d'ébullition ; on reprend ensuite chacune de ces portions, et on la rectifie une seconde et une troisième fois, s'il le faut, en ne considérant chaque produit obtenu comme pur, que lorsqu'il distille tout entier à une température invariable.

CHAPITRE VIII

HYGROMÉTRIE

---

350. **Notions préliminaires. — Hygrométrie. — État hygrométrique ou fraction de saturation.** — La présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère est démontrée par la précipitation de cette vapeur à la surface des corps froids, sous la forme d'une sorte de rosée, et par l'augmentation de poids qu'éprouvent dans l'air certains substances, dites *substances déliquescentes*, telles que le chlorure de calcium ou le carbonate de potasse.

Lorsque la vapeur atmosphérique est très-voisine de son point de saturation, il suffit d'un très-faible abaissement de température pour en déterminer la précipitation partielle ; on dit alors que l'air est *très-humide*. — Au contraire, quand la vapeur atmosphérique est très-éloignée de son point de saturation, il faut une variation considérable dans la température pour en opérer la condensation : on dit alors que l'air est *très-sec*.

Supposons que la tension de la vapeur soit égale à $12^{mm},5$, la température étant de 15°. La table III des forces élastiques (p. 241) nous apprend que la tension maximum à 15° est de $12^{mm},7$; à 14°, de $11^{mm},9$. Si donc la température venait à s'abaisser d'un degré seulement, c'est-à-dire de 15° à 14°, la quantité de vapeur primitivement contenue dans l'air serait plus que suffisante pour produire la saturation, et par suite, une portion de cette vapeur devrait se liquéfier : l'air est donc très-humide.

Si maintenant, la tension de la vapeur d'eau dans l'air ayant la même valeur de $12^{mm},5$, la température était de 20°, on voit que la vapeur serait très-éloignée de son point de saturation, puisque la température pourrait s'abaisser de 5° sans qu'il y eût condensation : l'air serait donc très-sec.

Le degré d'humidité de l'air dépend donc, non pas de la tension absolue de la vapeur, mais bien du *rapport qui existe entre la tension actuelle de la vapeur et la tension maxima à la même température*. Ce rapport se

nomme *état hygrométrique* de l'air, ou *fraction de saturation*. — Il résulte évidemment de cette définition que, dans l'air parfaitement sec, l'état hygrométrique est zéro, tandis qu'il est égal à l'unité dans l'air saturé de vapeur.

Remarque. — L'état hygrométrique peut encore être défini comme le rapport de deux poids. Soit f la force élastique actuelle de la vapeur d'eau dans l'air, et p le poids de vapeur que contient un volume V de cet air ; soit F la tension maxima à la même température, et P le poids de la vapeur que renfermerait le volume V s'il était saturé : si l'on admet que la loi de Mariotte soit applicable dans ces conditions, les poids p et P seront proportionnels aux forces élastiques f et F, et l'on pourra écrire :

$$\frac{f}{F} = \frac{p}{P}.$$

Or le quotient $\frac{f}{F}$ est l'état hygrométrique de l'air ; on voit donc qu'on peut encore définir *l'état hggrométrique* comme étant *le rapport entre le poids de la vapeur actuellement contenue dans un volume d'air déterminé et le poids maximum de vapeur que ce volume contiendrait s'il était saturé.*

L'*hygrométrie* a pour but la détermination de l'état hygrométrique de l'air ; les instruments dont on fait usage pour parvenir à ce résultat ont reçu le nom d'*hygromètres*.

* 351. **Méthode chimique.** — Cette méthode consiste à faire passer un volume d'air déterminé V à travers une série de tubes préalablement tarés, et contenant des matières avides d'eau. L'expérience étant terminée, on reporte les tubes dans la balance ; leur augmentation de poids fait connaître le poids p de la vapeur qui était contenue dans l'air sur lequel on a opéré. On peut alors appliquer la formule précédemment établie (309) :

$$(1) \qquad p = V \times 1^{gr},293 \times 0,622 \times \frac{f}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

Voyons comment on peut déterminer avec précision les diverses quantités qui entrent dans la formule. — On emploie pour cela une série de tubes en U (*fig.* 252), contenant des fragments de pierre ponce imprégnée d'acide sulfurique, et l'on fait passer un courant d'air à travers la série de ces tubes, au moyen d'un aspirateur V d'une cinquantaine de litres de capacité. L'air, entrant par l'extrémité c, abandonne toute son humidité dans les premiers tubes qu'il traverse. Le dernier tube A sert uniquement à empêcher la vapeur émise par l'eau de l'aspirateur de revenir jusque dans les premiers. — La tare des tubes B, C, D, E, F étant faite, l'aspirateur étant plein d'eau et les différentes pièces étant jointes entre elles par des tubes de caoutchouc, on ouvre les robinets de manière à déterminer un écoulement très-lent. Lorsque l'aspirateur est presque en-

tièrement vidé, on ferme les robinets, on note la hauteur H du baromètre, et la température t donnée par le thermomètre qui est placé dans l'aspirateur. On détache enfin les tubes de B à F, et l'on détermine la quantité

Fig. 252. — Hygromètre chimique.

p dont leur poids a augmenté. — Connaissant ainsi les valeurs de p, t et α qui entrent dans la formule (1), il ne reste plus qu'à trouver celle de V. Or V, qui est le volume de la vapeur, est aussi le volume de l'air qui a traversé les tubes desséchants ; cet air, s'il avait été débarrassé de sa vapeur, eût possédé, sous le même volume, une force élastique égale à $H - f$, f étant la tension actuelle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Mais ce même air s'est rendu dans l'aspirateur, dont le volume U a été déterminé une fois pour toutes par un jaugeage, et il s'y est saturé de vapeur à la tension F, F étant la tension maxima, donnée par les tables, pour la température t ; il occupe alors un volume U égal à celui de l'aspirateur ; débarrassé de sa vapeur, il aurait, sous ce nouveau volume, une force élastique égale à H — F. D'après la loi de Mariotte, on pourra donc écrire :

$$V(H - f) = U(H - F).$$

d'où

$$V = U\frac{H - F}{H - f}.$$

En reportant cette valeur de V dans la formule, il vient :

$$p = U\frac{H - F}{H - f} \times 1^{gr},293 \times 0,622 \times \frac{f}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t},$$

équation dont on pourra tirer f. — Le quotient $\frac{f}{F}$ sera l'état hygrométrique cherché.

L'expérience dure toujours plusieurs heures; pour que l'air abandonne dans les tubes dessiccateurs toute son humidité, il faut qu'il ne les traverse que très-lentement. Or, pendant un intervalle de temps aussi long, l'état hygrométrique de l'atmosphère varie en général dans des limites plus ou moins étendues: la valeur trouvée pour le rapport $\frac{f}{F}$ représente donc seulement l'état hygrométrique *moyen* de l'atmosphère pendant la durée de l'expérience.

352. **Hygromètre à cheveu ou hygromètre de H.-B. de Saussure.** — On a construit divers hygromètres en se fondant sur la propriété que possèdent certaines substances d'absorber la vapeur aqueuse de l'atmosphère en quantité d'autant plus grande que l'air est plus voisin de son point de saturation, et de s'allonger en raison de cette absorption (*).

Dans l'hygromètre de H.-B. de Saussure (*fig.* 253), c'est un cheveu AB qui indique, par ses variations de longueur, les changements qui surviennent dans le degré d'humidité de l'air. Ces variations sont amplifiées à l'aide d'une disposition fort simple; le cheveu est fixé en A, au moyen d'une petite pince, à la partie supérieure d'un cadre de laiton; en B, il s'attache à l'une des gorges d'une poulie parfaitement mobile, qui porte une aiguille légère C ayant son centre de gravité sur l'axe de rotation. L'extrémité de cette aiguille parcourt un arc divisé MM', fixé aux côtés du cadre. Dans l'autre gorge s'enroule un fil de soie qui porte un poids très-léger, destiné à maintenir le cheveu tendu lorsqu'il vient à s'allonger. Un petit

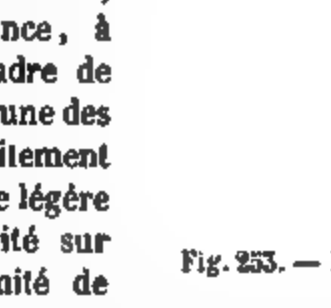


Fig. 253. — Hygromètre à cheveu.

(*) Sur cette remarque est fondée la construction de ces petits instruments devenus populaires, dont on se sert pour prévoir, avec plus ou moins de probabilité, la pluie ou le beau temps. Tantôt ils représentent un moine dont le capuchon vient abriter la tête quand le temps est à la pluie, tantôt ils figurent d'autres dispositions plus ou moins ingénieuses. Dans tous ces instruments, les mouvements de la pièce mobile sont produits par une corde à boyau qui se détord plus ou moins selon que le temps est plus ou moins humide.

levier mobile s sert à relever ce poids lorsque l'appareil n'est pas en expérience ; on évite ainsi de fatiguer inutilement le cheveu par une tension trop prolongée.

Les cheveux destinés à la construction des hygromètres doivent être, avant tout, débarrassés de la matière grasse dont ils sont naturellement enduits et qui les préserverait plus ou moins de l'action de l'humidité. A cet effet, on les maintient pendant une demi-heure environ dans une solution alcaline bouillante, renfermant un centième de carbonate de soude ; puis on les lave à l'eau pure et on les sèche.

353. **Détermination des points fixes de l'hygromètre à cheveu.** — Pour graduer l'hygromètre de de Saussure, on détermine ordinairement deux points fixes : le zéro ou point de *sécheresse extrême*, et le centième degré ou point d'*humidité extrême*.

L'humidité extrême s'obtient en suspendant l'instrument dans une large éprouvette à pied (*fig.* 254), fermée à la partie supérieure par un plan de verre ; au fond du vase, on a placé une couche d'eau de plusieurs centimètres de hauteur, et les parois ont elles-mêmes été mouillées. Le cheveu s'allonge rapidement dans cette atmosphère saturée d'humidité, et l'aiguille marche vers M. On note le point de l'arc MM′ où elle s'arrête.

Le zéro de la graduation peut s'obtenir d'une manière semblable, en remplaçant l'eau par de l'acide sulfurique concentré, qui absorbe l'humidité de l'air. — Mais il arrive en général, dans ces conditions, que l'aiguille met un temps fort long à se fixer, souvent plusieurs semaines; quelquefois même, le cheveu s'altère dans sa structure, et ne revient plus au point 100 quand on l'expose de nouveau à l'humidité extrême. Dans ce dernier cas, il faut évidemment le rejeter et le remplacer par un autre.

Fig. 254.

Les deux points fixes étant déterminés, on partage l'arc qu'ils comprennent en 100 parties égales ; ce sont les degrés de l'*hygromètre*.

354. **Détermination de l'état hygrométrique, au moyen de l'hygromètre à cheveu. — Tables de Gay-Lussac.** — La graduation déterminée comme il vient d'être dit ne suffit pas pour faire connaître immédiatement l'état hygrométrique de l'air où l'instrument est plongé, et l'on se tromperait fort si l'on croyait, par exemple, que l'hygromètre dût indiquer 25 ou 50 degrés dans des atmosphères saturées au quart ou à moitié. Il est nécessaire, une fois l'instrument gradué, de dresser une table qui donne les fractions de saturation correspondantes à chaque degré de l'hygromètre.

Plusieurs physiciens se sont occupés de cette question ; Gay-Lussac a

donné pour la résoudre une méthode fort simple, fondée sur ce principe, que *les vapeurs émises par les solutions aqueuses ont une force élastique d'autant moindre, toutes choses égales d'ailleurs, que ces solutions sont plus concentrées*. — En conséquence, il prépara un certain nombre de solutions d'acide sulfurique dans l'eau, et les introduisit tour à tour dans l'éprouvette représentée par la figure 254. A chaque expérience, l'aiguille marquait un certain degré : pour avoir la fraction de saturation correspondante, il suffisait de déterminer la tension f de la vapeur dans l'atmosphère de l'éprouvette, et de la diviser par la tension maxima F de la vapeur émise par l'eau pure à la même température ; or F était donné par les tables ; quant à f, on pouvait l'obtenir par le procédé de Dalton (294), en faisant passer au sommet d'un tube barométrique une petite quantité de la solution, et mesurant la dépression de la colonne mercurielle.

Ayant préparé neuf ou dix solutions diversement concentrées, on détermine, pour chacune d'elles, le degré de l'hygromètre et la fraction de saturation correspondante. Ces résultats obtenus, on trace une droite indéfinie OA (*fig.* 255), sur laquelle on marque des divisions égales entre

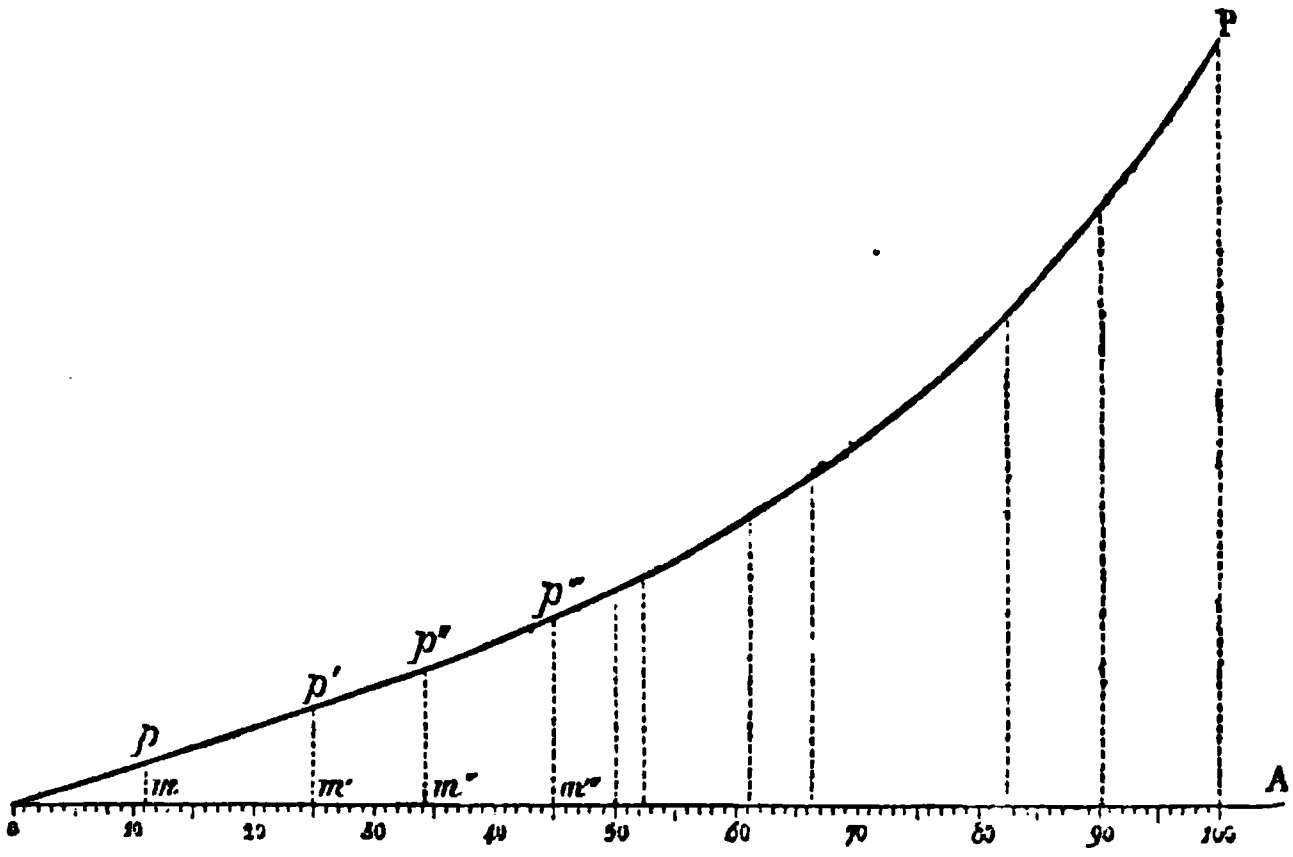


Fig. 255.

elles : chacune de ces divisions représentera un degré de l'hygromètre. Aux points m, m', m'', m''', ..., qui correspondent aux degrés auxquels l'aiguille s'est arrêtée dans chaque expérience, on élève sur OA des perpendiculaires mp, $m'p'$, $m''p''$, $m'''p'''$, ... proportionnelles aux fractions de saturation correspondantes ; enfin, on joint par un trait continu les extrémités de ces perpendiculaires. Si l'échelle adoptée est suffisamment grande, on aura, avec toute l'approximation désirable, l'état hygrométrique pour

un degré quelconque de l'instrument. —Pour obtenir, par exemple, la fraction de saturation qui correspond au cinquantième degré de l'hygromètre, on élèvera au point 50 une perpendiculaire sur OA, jusqu'à sa rencontre avec la courbe; la mesure de cette perpendiculaire, faite avec l'échelle adoptée, donnera la fraction cherchée. On opérera de même pour un point quelconque de la graduation.

Les expériences de Gay-Lussac ont été faites à la température de 10°; on en déduit par le calcul les nombres suivants, qui sont extraits d'une table plus étendue.

DEGRÉS de l'hygromètre.	FRACTIONS de saturation.
0.	0,000
10.	0,046
20.	0,094
30.	0,148
40.	0,208
50.	0,278
60.	0,363
70.	0,472
80.	0,612
90.	0,791
100.	1,000

On peut remarquer ici combien les variations de l'état hygrométrique sont loin d'être proportionnelles aux mouvements de l'aiguille de l'instrument. Ainsi, l'instrument indiquant la division 60, l'état hygrométrique n'est pas 0,60, mais seulement 0,36. —Il est donc indispensable d'avoir une table de ce genre, pour traduire les indications de l'instrument.

Une table analogue a été construite par Melloni pour la température de 23°; comme elle diffère très-peu de celle de Gay-Lussac, on admet en général que l'instrument doit donner les mêmes indications, *quelle que soit la température* de l'atmosphère. Cette hypothèse aurait besoin d'être confirmée par de nouvelles expériences.

* 355. **Expériences de M. Regnault.** —Il résulte des recherches de M. Regnault que deux hygromètres à cheveu sont rarement comparables entre eux; les plus légères différences de construction, par exemple celles qui tiennent à la provenance des cheveux, à la manière dont ils ont été dégraissés, à la grandeur des poids tenseurs, entraînent de notables divergences dans leurs indications.

De là la nécessité d'une table de graduation particulière à chaque instrument, au lieu d'une table unique. Afin d'éviter aux physiciens l'obligation de répéter pour chaque appareil toute la série des expériences de Gay-Lussac, M. Regnault a donné une table des tensions de la vapeur émise aux températures ordinaires de l'atmosphère par des solutions d'acide sulfurique dans l'eau, en proportions définies. Il suffit donc d'introduire

successivement ces solutions dans l'éprouvette (*fig.* 254); de noter, pour chacune d'elles, les indications de l'hygromètre qu'on veut graduer, et de prendre comme fraction de saturation correspondante le quotient de la tension de la vapeur de la solution par la force élastique maximum de la vapeur d'eau pure à la même température.

Enfin, M. Regnault, frappé des altérations que le cheveu peut éprouver dans une atmosphère absolument dépourvue d'humidité, renonce à déterminer directement le point 0 de l'hygromètre. A la graduation de de Saussure, il substitue une graduation tout à fait arbitraire, et détermine ensuite, comme nous venons de l'exposer, l'état hygrométrique correspondant à un certain nombre de divisions.

356. **Principe des hygromètres à condensation.** — Le principe sur lequel sont fondés les hygromètres à condensation a été indiqué et appliqué pour la première fois en 1752, par Leroy, médecin à Montpellier. — Quand un corps se refroidit dans l'atmosphère, il refroidit la couche d'air humide dont il est enveloppé, sans que la force élastique de la vapeur contenue dans cet air soit modifiée (*). Mais on sait que, à des températures de plus en plus basses, il suffit de quantités de vapeur de plus en plus petites pour saturer un espace déterminé; il arrive donc un instant où la vapeur contenue dans la couche considérée est suffisante pour la saturer. Si, à partir de cet instant, la température continue à décroître, une portion de la vapeur se précipite sur la surface refroidie et la couvre d'un dépôt de rosée. — Supposons qu'on soit parvenu à trouver exactement la température t à laquelle ce dépôt a pris naissance, ou ce qu'on nomme le *point de rosée*. Comme la tension de la vapeur n'a pas changé, et qu'à t degrés cette vapeur est devenue saturante, si l'on cherche dans la table III (page 241) la force élastique maximum f pour la température observée, on aura la tension actuelle de la vapeur : celle-ci, divisée par la tension maxima F pour la température T de l'atmosphère, donnera pour quotient l'état hygrométrique cherché.

357. **Hygromètre de Daniell.** — L'hygromètre de Daniell (*fig.* 256) est un hygromètre à condensation, disposé de manière à fournir très-aisément le *point de rosée*. — Il se compose d'un tube de verre recourbé *abcd*, dont les deux branches sont inégales et terminées chacune par une boule. La boule A, qui termine la grande branche, est en verre bleu ou noir : sa surface doit être aussi brillante que possible, car c'est sur elle qu'on observe le dépôt de rosée; elle contient une certaine quantité

(*) On peut s'en rendre compte par le raisonnement suivant : la force élastique totale H de la couche d'air humide que nous considérons est égale, d'après la loi du mélange des gaz et des vapeurs, à la force élastique h de l'air sec, plus la tension f de la vapeur. Mais, pendant le refroidissement, H demeure toujours égal à la pression barométrique du moment; quant à h, il décroît, par l'abaissement de température, d'une quantité précisément égale à celle dont il augmente par suite de la diminution de volume; donc f, qui est la différence entre H et h, reste lui-même constant pendant toute la durée de l'expérience.

d'éther dans lequel plonge le réservoir d'un thermomètre *t*. La boule B est entourée d'une toile fine. — Avant de fermer l'appareil, on en a chassé l'air par l'ébullition de l'éther.

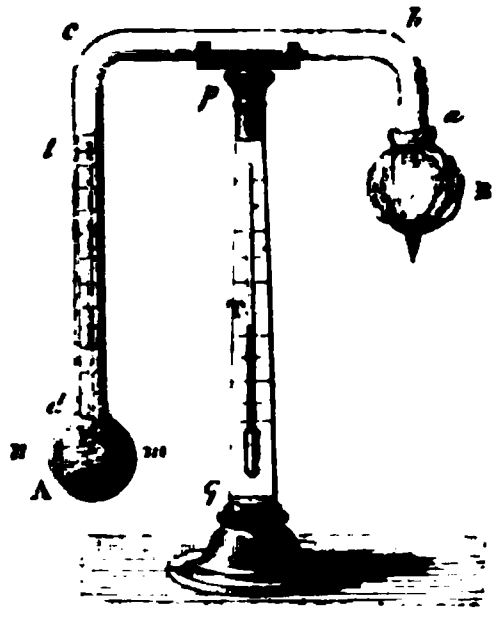


Fig. 256. — Hygromètre de Daniell.

Sur le pied *pq* de l'instrument est fixé un second thermomètre T, destiné à donner la température de l'air ambiant pendant les expériences.

Pour trouver l'état hygrométrique à un moment déterminé, au moyen de l'hygromètre de Daniell, on verse goutte à goutte de l'éther sur la boule B, qui se refroidit par l'évaporation de ce liquide. Dès qu'il existe une différence de température entre les deux boules, le liquide contenu dans la plus chaude se vaporise et va se condenser dans la plus froide. Cette vaporisation du liquide ntérieur a pour effet de refroidir à son tour la boule A ; au bout de quelque temps, la vapeur doit donc se précipiter sur sa surface, autour de la surface *mn* du liquide qu'elle contient ; le thermomètre intérieur fait connaître la température *t* du point de rosée.

On doit remarquer cependant que, le refroidissement se propageant de l'intérieur vers l'extérieur, le liquide dans lequel plonge le thermomètre est nécessairement un peu plus froid que l'air qui environne la boule, et la température observée *t* est toujours un peu trop basse. Pour atténuer cette cause d'erreur, on laisse l'appareil se réchauffer lentement, et l'on note l'indication t_1 du thermomètre à l'instant où la couche humide disparait : en général, t_1 est un peu supérieur à *t*, et l'on prend la moyenne $\frac{t+t_1}{2}$ pour température du point de rosée.

358. **Hygromètre de M. Regnault.** — L'hygromètre de M. Regnault (*fig.* 257) est un perfectionnement de celui de Daniell. L'éther est contenu dans un tube de verre A, terminé par un dé d'argent mince et brillant B. Un thermomètre très-sensible T plonge dans le liquide, ainsi qu'un petit tube C qui s'ouvre à l'extérieur. La partie supérieure du tube A communique, par un long tube de caoutchouc, avec un aspirateur semblable à celui de la figure 252, mais ayant seulement 2 à 3 litres de capacité ; il est placé à plusieurs mètres de distance de l'hygromètre, et quand on l'ouvre on produit un courant d'air qui pénètre en C, traverse l'éther et en active la vaporisation. — Pour saisir avec exactitude le point de rosée, on dispose à côté du dé d'argent B un autre dé B′ tout semblable, mais qui ne contient pas d'éther : il permet de juger, par contraste, de l'état de la surface B. Ordinairement l'expérimentateur observe l'appareil de loin, au moyen d'une lunette disposée à côté de l'aspirateur ; cette lunette permet d'apercevoir à la fois les deux dés B et B′, ainsi que les divisions grossies

des deux thermomètres T et T', dont l'un donne la température du point de rosée, l'autre la température de l'atmosphère. En réglant convenablement l'écoulement de l'eau, on parvient à faire apparaître et disparaître

Fig. 257. — Hygromètre de M. Regnault.

successivement la rosée à des températures de plus en plus rapprochées ; la moyenne de deux observations consécutives, fait donc connaître, avec une grande précision, la température à laquelle la vapeur atmosphérique est devenue saturante.

Les avantages de cet hygromètre sur celui de Daniell sont faciles à apercevoir. — 1° Le dé métallique, sur lequel se fait le dépôt, étant plus conducteur que le verre de l'hygromètre de Daniell, la température du liquide intérieur est moins différente de celle de l'air extérieur. — 2° L'expérience peut être conduite, ainsi qu'on vient de le dire, de façon à déterminer la température qui correspond à l'apparition de la rosée avec une grande précision, car l'opérateur, après avoir déjà trouvé approximativement, par plusieurs expériences, la température du point de rosée, peut régler l'évaporation de l'éther, au moment où il voit le thermomètre T approcher de cette température, de manière à faire apparaître et disparaître à volonté les gouttelettes liquides. — 3° Enfin, on n'a pas à craindre

que la respiration de l'observateur introduise accidentellement de la vapeur dans les couches atmosphériques qui environnent l'hygromètre.

359. **Psychromètre.** — Le psychromètre se compose de deux thermomètres A et A′ (*fig.* 258), très-sensibles et parfaitement d'accord, fixés l'un à côté de l'autre sur un même pied. Le réservoir du thermomètre A′, couvert d'une toile fine, est maintenu constamment humide à l'aide d'une petite mèche de coton, venant d'un réservoir B qui contient de l'eau. Le liquide se vaporise à la surface du réservoir, et lui prend la chaleur nécessaire à son changement d'état; le thermomètre A′ marque donc une température t' inférieure à la température t de l'atmosphère, donnée par le thermomètre A, et la différence $t - t'$ est d'autant plus grande que l'évaporation est plus rapide, c'est-à-dire que l'air est plus éloigné de son point de saturation.

Fig. 258. — Psychromètre.

On calcule la force élastique actuelle x de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, au moyen de la formule empirique

$$x = F' - A(t - t')H,$$

dans laquelle F′ est la tension maximum pour la température t', H la pression donnée par le baromètre au moment de l'observation; enfin A est un coefficient numérique qui varie avec le mode d'exposition de l'instrument, depuis 0,00074 environ jusqu'à 0,00128. On le détermine par une expérience préliminaire (*).

On doit à Leslie, physicien écossais, la première idée du psychromètre; c'est M. August, de Berlin, qui lui a donné sa forme actuelle; M. Re-

(*) Pour effectuer cette détermination, on installe l'instrument à la place qu'il doit occuper, en le garantissant autant que possible des courants d'air trop rapides; on observe les températures t et t' des deux thermomètres, ainsi que la pression H, et l'on cherche F′ dans les tables, on détermine la tension x, soit par la méthode chimique, soit au moyen de l'hygromètre de M. Regnault. On connaît alors toutes les quantités qui entrent dans la formule, sauf A: il est donc facile d'en tirer la valeur de ce coefficient. On porte enfin cette valeur dans la formule, qui peut servir ensuite à déterminer x dans un moment quelconque, tant que l'instrument demeure à la même place, pourvu que l'on détermine, à chaque expérience, les quantités H, t et t'.

gnault, enfin, a fait connaître la marche à suivre pour en tirer des résultats exacts, celle même que nous venons d'indiquer. — Cet instrument, dont on fait usage dans certains observatoires, a l'avantage d'être facile à consulter et de n'exiger de l'observateur aucune manipulation; on peut en faire enregistrer les indications aux diverses heures du jour, et charger de ce soin l'aide le moins initié aux études scientifiques.

CHAPITRE IX

CALORIMÉTRIE

---

360. **Objet de la calorimétrie.** — La *calorimétrie* est la mesure des *quantités de chaleur* dont l'absorption ou le dégagement correspondent, pour les divers corps, à des effets déterminés.

Nous diviserons l'étude de la calorimétrie en deux parties : 1° l'étude des *chaleurs spécifiques*, c'est-à-dire des quantités de chaleur nécessaires pour produire des variations de température sensibles au thermomètre ; 2° l'étude des *chaleurs latentes*, c'est-à-dire des quantités de chaleur nécessaires pour produire les changements d'état.

361. **Principes préliminaires.** — Les méthodes expérimentales que nous allons exposer reposent essentiellement sur deux principes qu'il importe d'établir d'abord.

1° *La quantité de chaleur nécessaire pour échauffer un corps, depuis une température* t *jusqu'à une température* t', *est égale à la quantité de chaleur que ce même corps abandonnerait en se refroidissant de* t' *à* t. — Ainsi, pour échauffer un kilogramme d'eau de 20° à 30°, il faut lui donner une quantité de chaleur égale à celle qu'il abandonnerait en se refroidissant de 30° à 20°.

2° *La quantité de chaleur nécessaire pour échauffer un corps, d'un certain nombre de degrés, est proportionnelle à l'élévation de température qu'on veut obtenir*. Ainsi, pour élever de 10° à 30° la température de 1 kilogramme d'eau, il faut 2 fois autant de chaleur que pour élever de 10° à 20° la température de ce même poids d'eau.

De ces deux propositions, la première peut être regardée comme évidente par elle-même ; la seconde est une conséquence de l'expérience, au moins pour les variations de température peu considérables. — Si, en effet, on mêle 1 kilogr. d'eau à 30° avec 1 kilogr. d'eau à 10°, on trouve que le mélange prend la température moyenne de 20°. Or la quantité de chaleur que le premier a abandonnée, en s'abaissant de 30° à 20°, est

égale, d'après la première proposition, à celle qui l'élèverait de 20° à 30°; d'autre part, dans l'expérience, cette quantité de chaleur a élevé le second kilogramme de 10° à 20°. Donc, pour élever de 10° à 30° la température de 1 kilogramme d'eau, il faut 2 fois autant de chaleur que pour l'élever de 10° à 20°.

362. **Unité de chaleur; calorie.** — Dans l'évaluation des quantités de chaleur, on a dû adopter une unité conventionnelle :

On nomme unité de chaleur *ou* calorie, *la quantité de chaleur nécessaire pour élever de* 1 *degré la température de* 1 *kilogramme d'eau.*

I. — MESURE DES CHALEURS SPÉCIFIQUES

363. **Chaleurs spécifiques.** — L'expérience montre que des poids égaux de corps différents exigent, en général, pour s'échauffer d'un même nombre de degrés, des quantités inégales de chaleur. — Si, par exemple, on plonge 1 kilogramme de cuivre, préalablement échauffé à 100°, dans une masse d'eau à 0° pesant 1 kilogramme, on trouve que, une fois l'équilibre de température établi, le mélange a pris la température de 9° environ. La chaleur gagnée par l'eau étant précisément celle que le cuivre a perdue, on voit que, pour élever de 9 degrés la température de 1 kilogramme d'eau, il faut autant de chaleur que pour élever de 91 degrés la température de 1 kilogramme de cuivre. Donc, pour éprouver une même variation de température, le cuivre exigerait, à poids égal, environ 10 fois moins de chaleur que l'eau.

On nomme chaleur spécifique *ou* capacité calorifique *d'un corps la quantité de chaleur nécessaire pour élever de* 1 *degré la température de* 1 *kilogramme de ce corps.*

Si l'on rapproche cette définition de celle de l'unité de chaleur (362) on voit immédiatement que *la chaleur spécifique de l'eau est égale à l'unité.*

364. **Expression de la quantité de chaleur correspondante à une variation déterminée de température, pour un corps déterminé.** — Supposons qu'un morceau de cuivre pesant 5 kilogrammes ait été chauffé de 0° à 100° : soit 0,095 la chaleur spécifique du cuivre. D'après la définition même de la chaleur spécifique, 1 kilogramme de cuivre, pour s'échauffer de 1°, exige $0^{cal},095$; 5 kilogrammes, en s'échauffant de 1°, prendront $0^{cal},095 \times 5$; et; et, pour s'échauffer de 100°, ces 5 kilogrammes exigeront 100 fois cette dernière quantité (361, 2°), savoir $0^{cal},095 \times 5 \times 100$, ou $47^{cal},5$.

Ce même produit exprime aussi (361, 1°) la quantité de chaleur qu'abandonneraient 5 kilogr. de cuivre, en se refroidissant depuis 100° jusqu'à 0°. — Donc :

La quantité de chaleur qu'un poids déterminé d'un corps absorbe ou

abandonne quand sa température s'élève ou s'abaisse d'un nombre de degrés déterminé, s'obtient en multipliant la chaleur spécifique de ce corps par son poids et par le nombre de degrés qui exprime la variation de température.

En général, soit p le poids d'un corps, c sa chaleur spécifique : la quantité q de chaleur qu'il absorbe, pour s'élever de t à t', ou qu'il abandonne en s'abaissant de t' à t, est :

$$q = pc(t' - t).$$

Si ce corps était de l'eau, dont la chaleur spécifique est égale à l'unité, la quantité q' de chaleur perdue ou gagnée serait simplement

$$q' = p(t' - t);$$

365. Principe de la méthode des mélanges, pour la détermination expérimentale des chaleurs spécifiques. — L'une des méthodes les plus exactes, pour déterminer les chaleurs spécifiques des corps, est la *méthode des mélanges*, qui est due au physicien écossais Black. — On chauffe à une température déterminée un poids connu du corps soumis à l'expérience; puis on plonge ce corps dans une masse d'eau, dont on connait le poids et la température. Le corps se refroidit, en cédant à l'eau une portion de sa chaleur ; quand l'équilibre de température est établi, on note la température du mélange. On exprime ensuite que *la quantité de chaleur perdue par le corps est égale à la quantité de chaleur gagnée par l'eau,* ce qui conduit, comme nous allons l'indiquer, à une équation dont l'inconnue est la chaleur spécifique demandée.

Soit P le poids du corps, T la température initiale à laquelle il est chauffé, x sa chaleur spécifique inconnue; soit M le poids de l'eau, t sa température initiale; enfin, soit θ la température finale du mélange, c'est-à-dire la température commune au corps et à l'eau quand l'équilibre est établi. Le corps s'étant refroidi de T à θ degrés, sa température s'est abaissée d'un nombre de degrés égal à $(T - \theta)$; la quantité de chaleur qu'il a perdue est donc exprimée (364) par le produit $Px(T - \theta)$; l'eau s'étant échauffée de t à θ degrés, sa température s'est élevée d'un nombre de degrés égal à $(\theta - t)$; la quantité de chaleur qu'elle a gagnée est donc $M(\theta - t)$. En égalant la chaleur gagnée par l'eau à celle que le corps a perdue, on a :

$$(1) \qquad Px(T - \theta) = M(\theta - t).$$

De cette équation on tire la valeur de l'inconnue x, savoir :

$$x = \frac{M(\theta - t)}{P(T - \theta)}.$$

Toutefois, pour que le résultat soit exact, il est nécessaire d'effectuer plusieurs corrections, que nous allons maintenant indiquer.

366. *Corrections à faire subir aux résultats précédents.* — Le raisonnement qui précède suppose que toute la chaleur abandonnée par le corps a été absorbée par l'eau. En réalité, l'eau est contenue dans un vase de laiton très-mince, ou *calorimètre* (*fig.* 259), qui s'est échauffé en même temps que l'eau, et a pris une portion de cette chaleur. — Désignons par c la chaleur spécifique du laiton et par p le poids du calorimètre ; la quantité de chaleur que ce dernier a gagnée, en s'échauffant de t à θ degrés, est $pc(\theta - t)$, quantité qui doit être ajoutée au second membre de l'équation (1). — Le produit pc du poids du calorimètre par sa chaleur spécifique, est désigné ordinairement par l'expression de *valeur du calorimètre transformé en eau* : on voit, en effet, qu'un poids d'eau égal à pc absorberait, en s'échauffant de $\theta - t$ degrés, une quantité de chaleur $pc\ (\theta - t)$, c'est-à-dire précisément autant que le calorimètre lui-même (*).

Fig. 259.

Enfin, quand on opère sur un corps que l'eau peut dissoudre ou attaquer chimiquement, on doit le préserver du contact de ce liquide : on l'enferme alors dans un vase à parois très-minces, par exemple dans une petite fiole de verre ou de métal, et l'on plonge le tout ensemble dans l'eau du calorimètre. — Soit p_1 le poids de cette enveloppe et c_1 sa chaleur spécifique; la quantité de chaleur qu'elle abandonne à l'eau est $p_1c_1\ (T - \theta)$, quantité qui doit être ajoutée au premier membre de l'équation (1).

On obtient ainsi la nouvelle équation :

$$(2) \qquad (Px + p_1c_1)\ (T - \theta) = (M + pc)\ (\theta - t),$$

(*) Pour tenir compte de cette influence du calorimètre, on voit qu'il faut connaître la chaleur spécifique du laiton dont ce vase est formé ; on l'obtient par une expérience préliminaire. On plonge dans l'eau du calorimètre un poids connu P_1 de laiton, préalablement chauffé à une température connue T_1, et l'on détermine la température finale θ_2 du mélange. Soit M_1 le poids de l'eau et t_1 sa température initiale, en raisonnant comme dans le cas d'un corps quelconque, on aura, pour déterminer c, l'équation :

$$P_1c(T_1 - \theta_2) = (M_1 + pc)\ (\theta_2 - t_1);$$

on en tire :

$$c = \frac{M_1(\theta_2 - t_1)}{P_1(T_1 - \theta_2) - p(\theta_2 - t_1)}.$$

d'où l'on tire :

$$x = \frac{(M + pc)(\theta - t) - p_1 c_1 (T - \theta)}{P(T - \theta)} \text{ (*)}.$$

367. Appareil de M. Regnault. — La disposition adoptée par M. Regnault, pour l'application de la méthode des mélanges, offre surtout l'avantage de donner la température initiale avec une grande exactitude, et d'atténuer beaucoup les diverses causes d'erreur des différentes phases de l'expérience.

Le corps est placé dans une corbeille de fil de laiton très-mince C (*fig* 260);

Fig. 260. — Détermination des chaleurs spécifiques (appareil de M. Regnault).

dans l'axe de cette corbeille, vient se loger le réservoir d'un thermomètre T. Pour échauffer le corps, on suspend la corbeille, par des fils de soie, dans une étuve EE chauffée par la vapeur d'eau. Cette étuve se compose de trois enceintes : dans l'enceinte du milieu se trouve la corbeille : dans l'espace annulaire qui l'entoure, on fait circuler un courant de vapeur que fournit une chaudière A, et qui s'échappe ensuite par le tuyau F, ou va se condenser dans un serpentin; enfin, la troisième enceinte contient de l'air et fait l'office d'un manchon qui préserve la vapeur du refroidis-

(*) Dans les recherches très-précises, on pousse encore plus loin l'exactitude : on tient compte aussi de la chaleur absorbée par le thermomètre K, qui reste plongé dans l'eau pendant l'expérience — Soit p' le poids du mercure du thermomètre et c' la chaleur spécifique du mercure, p'' le poids de la portion de verre immergée et

sement. — L'étuve EE repose sur une sorte de caisse métallique coudée LHG, qui contient de l'eau à la température du laboratoire; la portion horizontale de cette caisse est traversée par une ouverture cylindrique qui correspond à la chambre centrale de l'étuve et qu'on tient fermée, pendant l'échauffement du corps, au moyen d'un registre P. — Le calorimètre K est placé sur un support qui peut glisser le long d'une coulisse de bois RR′.

Pour faire une expérience avec cet appareil, on fait circuler la vapeur dans l'étuve jusqu'à ce que le thermomètre T indique, pendant une demi-heure au moins, une température parfaitement stationnaire; pendant ce temps, on tient baissé l'écran MN, qui préserve le calorimètre contre le rayonnement de l'étuve et de la chaudière. On note alors les températures marquées par les thermomètres T et t, on relève l'écran, on retire le registre P et l'on amène le calorimètre sous l'étuve (dans cette position, il est garanti du rayonnement par la caisse LHG); détachant enfin en n le fil de soie qui soutient la corbeille, on laisse descendre celle-ci jusque dans l'eau, après quoi on ramène rapidement le calorimètre vers R′ et l'on abaisse de nouveau l'écran MN. Le thermomètre t monte très-vite dans les premiers instants, puis de plus en plus lentement, et enfin il atteint un maximum où il demeure stationnaire pendant quelque temps, pour redescendre ensuite à cause du refroidissement extérieur : c'est évidemment ce maximum qui constitue la température θ, relative à l'état d'équilibre entre l'eau et le corps immergé. — Connaissant les poids du corps, de la corbeille, de l'eau et du calorimètre, on a toutes les données nécessaires pour calculer la chaleur spécifique cherchée.

368. *Détails de construction du calorimètre.* — Dès que la température du calorimètre s'élève au-dessus de la température extérieure, il perd de la chaleur, soit par rayonnement, soit par le contact de l'air, soit par la conductibilité des supports. Pour atténuer, autant que possible, l'influence de chacune de ces causes d'erreur, on a pris les précautions suivantes.

On polit avec soin la surface extérieure du calorimètre, pour diminuer son pouvoir émissif. — On entoure le calorimètre d'un second vase de laiton, poli intérieurement, qui lui renvoie par réflexion presque toute la chaleur émise et le préserve des agitations de l'air (voir la figure 260).— Enfin, on le fait reposer sur deux fils de soie, tendus en croix à une petite

c'' la chaleur spécifique du verre ; la chaleur gagnée par le thermomètre est $(p'c' + p''c'')\ (\theta - t)$. En ajoutant cette quantité au second membre de l'équation, on obtient enfin celle-ci sous sa forme la plus complète, savoir :

$$(3) \qquad (Px + p_1c_1)\ (T - \theta) = (M + p'c' + p''c'')\ (\theta - t).$$

Les produits $p'c'$, $p''c''$ étant très-petits par rapport à M, il suffit de connaître approximativement les valeurs de c' et de c'' ; on les détermine en faisant une expérience sur le mercure et une autre sur le verre, et négligeant, dans ces expériences, la chaleur cédée au thermomètre.

distance au-dessus du fond du vase extérieur : la chaleur transmise par la conductibilité des supports est alors sensiblement négligeable.

*369. **Méthode des compensations, pour diminuer l'influence des pertes de chaleur du calorimètre.** — Malgré les précautions que nous venons d'indiquer, on ne peut pas considérer les pertes de chaleur du calorimètre comme complétement annulées. On emploie souvent, pour en diminuer encore l'effet, la *méthode des compensations*, qui est due à Rumford.

Cette méthode consiste à faire en sorte que la température initiale t de l'eau du calorimètre soit inférieure de 2 ou 3 degrés à la température t' de l'air environnant, et à régler le poids de cette eau de façon que la température finale θ surpasse t' d'un nombre de degrés sensiblement égal à l'excès de t' sur t; alors, si le calorimètre emploie le même temps pour s'élever de t à t' degrés que de t' à θ, il est évident qu'il doit recevoir, de l'air et des corps environnants, autant de chaleur pendant la première période de l'opération, qu'il leur en cède pendant la seconde, et les effets dus au rayonnement et au contact de l'air doivent être compensés.

Une discussion rigoureuse montre que la compensation n'est jamais absolue; cependant cette méthode doit être considérée comme diminuant au moins beaucoup les causes d'erreur (*).

* 370. **Chaleur spécifique des gaz.** — C'est encore par la méthode des mélanges, convenablement modifiée, qu'on a déterminé les chaleurs spécifiques des corps gazeux. — L'opération consiste essentiellement à faire passer, sous une pression déterminée, dans un serpentin entouré d'eau froide, une quantité connue du gaz sur lequel on veut opérer, et à noter le nombre de degrés dont la température de l'eau s'est accrue. On exprime ensuite que la quantité de chaleur cédée par le gaz est égale à la quantité de chaleur gagnée par l'eau, par les parois du calorimètre et par le métal du serpentin. L'équation ainsi obtenue fait connaître la chaleur spécifique cherchée.

371. **Résultats.** — Nous réunissons, dans le tableau suivant, les chaleurs spécifiques d'un certain nombre de corps solides, liquides et gazeux : ces résultats sont empruntés aux mémoires de M. Regnault.

(*) L'hypothèse que nous venons de faire sur le réchauffement du calorimètre n'est qu'une approximation; en réalité, le corps immergé cède d'autant plus rapidement sa chaleur à l'eau qu'il y a une plus grande différence entre sa température et celle de l'eau : le calorimètre met donc beauconp moins de temps à s'élever de t à t' degrés qu'à s'élever ensuite de t' à θ. Il est préférable, pour cette raison, de régler la quantité d'eau employée, de telle manière que la différence $\theta - t'$ soit au plus égale à la moitié de $t' - t$.

TABLEAU DES CHALEURS SPÉCIFIQUES

CORPS SOLIDES ET LIQUIDES.

Acier	0,11848	Fer	0,11379
Antimoine	0,05077	Fonte blanche	0,12983
Argent	0,05701	Iode	0,05412
Arsenic	0,08140	Laiton	0,09391
Bismuth	0,03084	Mercure	0,03332
Cadmium	0,05669	Nickel	0,10863
Carbone (charbon de bois)	0,24150	Or	0,03244
— diamant	0,24680	Palladium	0,05927
— plombagine	0,21800	Phosphore	0,18870
Cobalt	0,10796	Platine	0,03243
Cuivre battu à froid	0,09350	Plomb	0,03140
— fondu	0,09410	Sélénium	0,08370
— recuit	0,09490	Soufre	0,20259
Eau	1,00000	Verre	0,19768
Essence de térébenthine	0,42595	Zinc	0,09555
Étain (des Indes)	0,05625		

CORPS GAZEUX.

Acide carbonique	0,20246	Brome (vapeur de)	0,05552
— chlorhydrique	0,18520	Chlore	0,12099
— sulfhydrique	0,24318	Hydrogène	3,40900
— sulfureux	0,15531	— bicarboné	0,40400
Air	0,23741	— protocarboné	0,59285
Ammoniaque	0,50836	Oxyde de carbone	0,24500
Azote	0,24380	Oxygène	0,21751
Bioxyde d'azote	0,23175	Protoxyde d'azote	0,34470

On voit que, pour certains corps, comme le charbon ou le cuivre, des différences dans l'état physique déterminent dans la capacité calorifique des variations sensibles.

*372. **La chaleur spécifique n'est pas absolument constante, pour un même corps, aux diverses températures.** — Nous avons admis, au commencement de ce chapitre (361), qu'en mélangeant deux poids égaux d'un même corps, on obtient une température égale à la moyenne arithmétique des deux températures initiales. Cette hypothèse revient à supposer que la chaleur spécifique d'un corps reste *constante* dans l'échelle thermométrique, c'est-à-dire que, pour élever de 1 degré la température de l'unité de poids d'un corps, il faut la même quantité de chaleur, quelle que soit sa température primitive. — Or l'expérience montre que, si les poids égaux que l'on mélange sont à des températures *très-éloignées* l'une de l'autre dans l'échelle thermométrique, la température finale du mélange est supérieure de quelques degrés à la moyenne des deux températures initiales. Si, par exemple, on mêle ensemble 1 kilogramme de mercure à 0° et 1 kilogramme de mercure à 300°, le mélange prend la température de 153° environ. Il en faut

conclure que 1 kilogramme de mercure, en se refroidissant de 147°, entre 300° et 153°, a abandonné une quantité de chaleur suffisante pour échauffer de 153° un poids égal du même corps, entre 0° et 153°; en d'autres termes, que la chaleur spécifique du mercure est plus grande entre 153° et 300° qu'entre 0° et 153°.

On voit aussi, par ces explications, que les nombres déterminés par les méthodes expérimentales précédemment décrites, sont en réalité les *chaleurs spécifiques moyennes*, entre les deux températures extrêmes de chaque expérience. — Les nombres suivants, obtenus par Dulong et Petit, montrent l'accroissement que subit, pour quelques corps, la chaleur spécifique moyenne, lorsqu'on augmente l'intervalle de ces limites.

NOMS DES CORPS.	CHALEURS SPÉCIFIQUES MOYENNES.	
	ENTRE 0 ET 100°	ENTRE 0 ET 300°.
Argent	0,0557	0,0611
Cuivre	0,0949	0,1013
Fer	0,1088	0,1218
Mercure	0,0350	0,0350
Zinc	0,0972	0,1015

II. — MESURE DES CHALEURS LATENTES

373. **Chaleur latente de fusion.** — *On nomme chaleur latente de fusion d'un corps la quantité de chaleur qu'absorbe 1 kilogramme de ce corps pour se fondre, sans élévation de température.* — Ainsi, la chaleur latente de fusion de la glace est la quantité de chaleur qu'il faut donner à 1 kilogramme de glace à 0°, pour la transformer entièrement en eau liquide à la même température.

374. **Détermination de la chaleur latente de fusion de la glace.** — On emploie la méthode des mélanges pour déterminer la chaleur latente de fusion de divers corps; nous l'appliquerons d'abord à la glace.

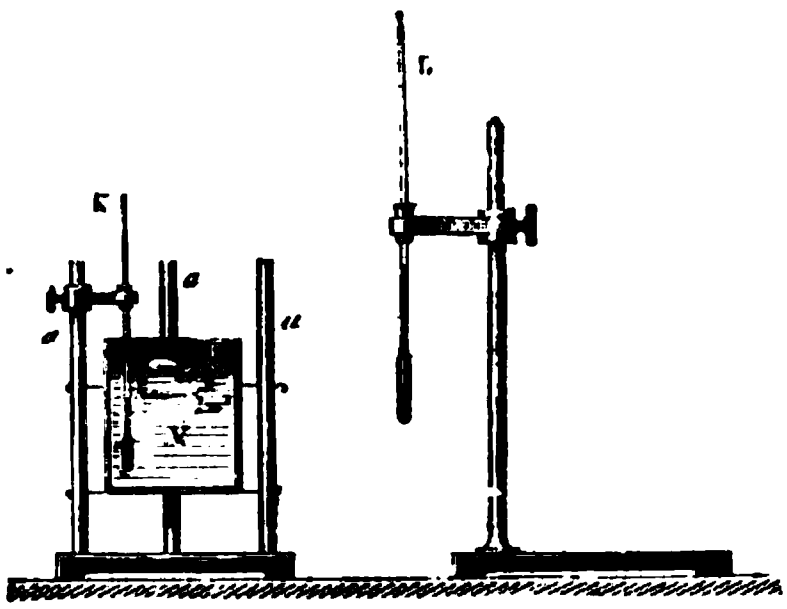


Fig. 261.

On introduit dans le calorimètre V (*fig.* 261) un poids connu d'eau, ayant une température supérieure de quelques degrés à celle de l'air environnant. Dans cette eau, on plonge un morceau de glace à 0°, après l'avoir bien essuyé avec du papier buvard; on agite le liquide pour hâter la fusion, et l'on note la température finale du mélange. Quant au poids de glace, on ne peut songer à l'obtenir par une pesée préalable,

pendant laquelle il serait impossible d'éviter la fusion : on détermine alors l'accroissement de poids qu'elle a fait éprouver au calorimètre. — L'équation du problème s'obtient en exprimant que la quantité de chaleur abandonnée par l'eau et par le calorimètre, qui se sont refroidis ensemble dé t à θ degrés, a été employée, d'une part à fondre la glace, d'autre part à échauffer de 0 à θ degrés l'eau provenant de la fusion.

Soit M le poids de l'eau, t sa température initiale, θ la température du mélange : la quantité de chaleur que cette eau a cédée, en se refroidissant de t à θ degrés, est $M(t-\theta)$. Soient p le poids du calorimètre et c la chaleur spécifique du laiton ; le calorimètre a perdu $pc(t-\theta)$. Désignons enfin par P le poids de la glace et par x sa chaleur latente de fusion : si 1 kilogramme de glace absorbe, en fondant, une quantité de chaleur x, P kilogrammes absorbent Px; d'autre part, les P kilogrammes d'eau provenant de la fusion prennent encore, en s'échauffant de 0° à θ degrés, une quantité de chaleur égale à $P\theta$. On aura donc l'équation :

$$(M+pc)\ (t-\theta)=Px+P\theta,$$

d'où l'on tire

$$x=\frac{(M+pc)\ (t-\theta)-P\theta}{P}.$$

En opérant ainsi, MM. de la Provostaye et P. Desains ont trouvé, pour la chaleur latente de fusion de la glace, le nombre 79,25. — Ce résultat a été confirmé par les expériences de M. Regnault et par celles de M. Person.

375. **Détermination des chaleurs latentes de fusion des diverses substances.** — La même méthode peut s'appliquer à la détermination des chaleurs latentes de fusion de toutes les substances qui sont liquides à la température ordinaire. On plonge encore, dans un poids d'eau M à la température t, un poids connu P du corps pris à l'état solide et à la température t' de sa fusion ; on détermine la température finale θ du mélange. — Si l'on désigne par γ la chaleur spécifique du corps à l'état liquide, l'équation du problème est :

$$(M+pc)\ (t-\theta)=Px+P\gamma(\theta-t').$$

Si la chaleur spécifique γ n'était pas connue, au lieu d'une expérience on en ferait deux, mais en employant des poids différents du corps et d'eau ; on aurait ainsi une seconde équation

$$(M_1+pc)\ (t-\theta_1)=P_1x+P_1\gamma(\theta_1-t'),$$

qui, jointe à la première, permettrait de déterminer x et γ.

Remarque. — Si le corps dont on cherche la chaleur latente était solide aux températures ordinaires de l'atmosphère, on l'introduirait tout fondu, à une température T, dans l'eau du calorimètre, et l'on obtiendrait l'équation du problème en égalant : d'une part, la somme des quantités de

chaleur que le corps a perdues, 1° en se refroidissant depuis la température T jusqu'à la température T′ de sa solidification, 2° en se solidifiant, 3° en se refroidissant de T′ à θ degrés ; d'autre part, la quantité de chaleur que l'eau et le calorimètre ont gagnée en s'échauffant de t à θ degrés. — En désignant par γ et γ' les chaleurs spécifiques, généralement différentes, du corps à l'état liquide et à l'état solide, l'équation qui fait connaitre x est alors :

$$P\gamma(T - T') + Px + P\gamma'(T' - \theta) = (M + pc)(\theta - t).$$

Si les quantités γ et γ' n'étaient pas connues, on ferait deux autres expériences avec des poids différents du corps et d'eau ; on aurait ainsi en tout trois équations, qui serviraient à calculer x, γ et γ'.

376. **Résultats.** — Le tableau suivant donne, pour un certain nombre de corps, les valeurs de la chaleur latente de fusion et des chaleurs spécifiques à l'état solide et à l'état liquide. — La plupart de ces nombres sont dus aux travaux de M. Person ; ceux qui se rapportent au phosphore, ainsi que la chaleur spécifique de la glace, ont été obtenus par M. Ed. Desains.

NOMS DES CORPS	POINT DE FUSION	CHALEUR LATENTE	CHALEUR SPÉCIFIQUE A L'ÉTAT	
			SOLIDE	LIQUIDE
Brome	7°,3	16,18	0 084	0,107
Bismuth	270	12,64	0,031	0,036
Eau	»	79,25	0,504	1.000
Étain	235	14,25	0,036	0,064
Mercure	40	2,82	0,032	0,033
Phosphore	44,3	5,03	0,18	0,20
Plomb	334	5,37	0,031	0,040
Soufre	115	9,37	0,203	0,234
Zinc	433	28,13	0,095	»

377. **Chaleur latente de vaporisation.** — *On nomme chaleur latente de vaporisation d'un liquide, à une température déterminée, la quantité de chaleur que ce liquide absorbe à cette température, pour se transformer en vapeur saturante.* — Ainsi, la chaleur latente de vaporisation de l'eau, à la température de 100°, est la quantité de chaleur qu'il faut donner à 1 kilogramme d'eau déjà chauffé à 100°, pour le transformer en vapeur saturante à la même température.

378. **Détermination de la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 100°.** — Les premières expériences précises, sur la chaleur latente de vaporisation de l'eau, furent exécutées par Despretz, au moyen de l'appareil représenté par la figure 262.

La cornue A contient de l'eau qu'on peut porter à l'ébullition ; elle

communique par le tube *tt* avec un calorimètre de cuivre, dont on voit la coupe sur la figure 263; *ss* est un serpentin qui débouche à sa partie inférieure dans une boîte métallique *bb'*, entourée de tous les côtés par l'eau du calorimètre; la face inférieure est inclinée, de façon que le

Fig. 262. — Chaleur latente de vaporisation de l'eau (appareil de Despretz)

liquide condensé coule toujours vers le tube qui est terminé par le robinet *r*; de la face supérieure, part un tube vertical terminé extérieurement par un robinet *r'*. Un agitateur *mnm'n'* sert à rendre uniforme la température de l'eau ambiante pendant l'expérience; enfin, l'écran de cuivre MN préserve le calorimètre contre le rayonnement du fourneau et de la cornue.

Pour déterminer la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 100°, on ouvre le robinet *r'* de manière à faire communiquer l'intérieur de l'appareil avec l'atmosphère, puis on fait bouillir l'eau. La vapeur produite arrive dans le serpentin, où elle se liquéfie; le liquide provenant de cette condensation se rassemble dans la caisse *bb'* et y prend la température de l'eau du calorimètre. Lorsqu'on a ainsi distillé une certaine quantité

d'eau, on met fin à l'expérience ; on note à ce moment la température du calorimètre, puis, ouvrant le robinet r, on recueille l'eau condensée et on en détermine le poids (*).

L'expérience terminée, on exprime que la quantité de chaleur gagnée par l'eau et par le calorimètre est égale à la somme des quantités de chaleur cédées, 1° par la vapeur en se liquéfiant, 2° par l'eau condensée en se refroidissant depuis 100° jusqu'à la température du calorimètre. — Soit t la température initiale du calorimètre, M le poids de l'eau qu'il contient, p le poids du cuivre qui compose le serpentin et le calorimètre, et c la chaleur spécifique du cuivre ; soit encore P le poids de la vapeur qui s'est condensée, T sa température, x la chaleur latente de vaporisation de l'eau, et θ la température finale du serpentin ; on aura l'équation :

$$(M + pc)\ (\theta - t) = Px + P\ (T - \theta),$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{(M + pc)\ (\theta - t) - P\ (T - \theta)}{P}.$$

379. **Chaleur latente de vaporisation de l'eau à diverses températures.** — Pour déterminer la chaleur latente de vaporisation de l'eau à des températures différentes de 100°, il suffit d'augmenter ou de diminuer la pression, de manière à faire bouillir l'eau à la température voulue ; c'est à quoi l'on arrive en faisant communiquer l'intérieur de l'appareil, par l'intermédiaire du robinet r', avec une pompe de compression ou avec une machine pneumatique.

Il est à peine nécessaire d'ajouter que, dans ces expériences, comme dans celles qui se font à 100°, il faut faire en sorte que le rayonnement du calorimètre n'ait que peu d'influence sur les résultats. On y parvient, au moins approximativement, en ayant recours à la méthode des compensations de Rumford (369).

* 380. **Chaleur totale de vaporisation de l'eau.** — *On nomme chaleur totale de vaporisation de l'eau à une température déterminée* t, *la quantité de chaleur qu'il faut donner à* 1 *kilogramme d'eau à* 0° *pour*

(*) Il importe d'éviter que la vapeur n'entraîne mécaniquement avec elle dans le calorimètre des particules d'eau liquide ; dans ce but, on incline le tube de prise de vapeur comme le montre la figure 262, et on le fait plonger assez avant dans la cornue. La vapeur qui pénètre dans ce tube se trouve alors, sur une portion de son parcours, protégée contre le refroidissement par la vapeur qui l'enveloppe ; et s'il s'en liquéfie un peu avant d'arriver au serpentin, elle retombe à l'état liquide dans la cornue, à cause de l'inclinaison du tube.

Il est nécessaire enfin de n'admettre la vapeur dans le calorimètre que lorsque l'eau est en pleine ébullition. On peut, à cet effet, n'adapter la cornue au serpentin qu'à ce moment ; mais il vaut mieux encore placer sur le tube tt' un robinet R à trois voies, semblable à celui que représente la figure 144, et qui permet de faire communiquer à volonté la cornue avec l'extérieur ou avec le serpentin. On établit d'abord la première communication ; puis, quand l'eau est en pleine ébullition, on tourne le robinet et on fait arriver la vapeur dans le calorimètre.

le transformer en vapeur saturante à la température t. — Si, par exemple, on désigne par λ la chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température de *t* degrés, comme il faut *t* unités de chaleur pour échauffer 1 kilogramme d'eau de 0° à *t* degrés, on voit que la chaleur totale de vaporisation à cette température est de $t + \lambda$ calories.

Les expériences de M Regnault ont établi que *la chaleur latente décroît à mesure que la température s'élève ;* que, au contraire, *la chaleur totale est croissante avec la température*, mais moins rapidement que la température elle-même.

Les diverses valeurs de la *chaleur totale* sont d'ailleurs représentées par la formule empirique

$$\text{Chal. tot.} = 606{,}5 + 0{,}305\ t.$$

381. **Chaleur latente de vaporisation des divers liquides.** — La méthode employée pour déterminer la chaleur latente de vaporisation de l'eau peut s'appliquer, sans aucune modification, aux autres liquides. Nous nous bornerons à donner quelques résultats obtenus en opérant sous la pression de l'atmosphère.

NOMS DES CORPS.	POINTS D'ÉBULITION.	CHALEURS LATENTES.
Acide acétique.	120,0	102
Alcool.	78,0	208
Eau.	100,0	537
Esprit de bois.	66,5	264
Essence de térébenthine. . .	156,0	69
Éther sulfurique.	35,5	91

CHAPITRE X

CHAUFFAGE ET MACHINES A VAPEUR

I. — NOTIONS SUR LES DIVERS MODES DE CHAUFFAGE DES APPARTEMENTS

382. **Appareils de chauffage, en général.** — Les appareils employés pour le chauffage des appartements varient beaucoup dans leurs dispositions ; ils se composent, en général, de deux parties distinctes, le *foyer* et la *cheminée*. — Le foyer est le lieu où s'effectue la combustion ; la cheminée sert à rejeter la fumée dans l'atmosphère, en même temps qu'elle appelle dans le foyer l'air nécessaire à la combustion.

383. **Foyers.** — Les foyers dont on fait le plus habituellement usage dans nos contrées sont les *foyers découverts* (cheminées d'appartement), et les *poêles*.

Dans les foyers découverts, on n'utilise que la chaleur rayonnée par le combustible, et on ne l'utilise même qu'en partie ; l'air brûlé s'échappe dans la cheminée, emportant avec lui une grande quantité de chaleur qui ne contribue pas au chauffage. De plus, l'air de l'appartement se laisse traverser par les rayons calorifiques, et ne s'échauffe qu'après que les parois de la chambre ont été elles-mêmes échauffées.

Les poêles sont plus avantageux sous le rapport de l'économie : ils absorbent une fraction notable de la chaleur dégagée par la combustion et la cèdent ensuite à l'appartement, soit sous forme de chaleur rayonnante, soit en échauffant par contact l'air qui se renouvelle sans cesse autour d'eux. — Les poêles de fonte ou de tôle s'échauffent rapidement et se refroidissent de même ; les poêles de faïence s'échauffent lentement, mais, une fois échauffés, ils cèdent lentement leur chaleur et entretiennent pendant longtemps une douce température.

Mais, si les poêles produisent un chauffage plus économique que les foyers découverts, ils présentent, au point de vue de l'hygiène, d'incon-

testables inconvénients. Leurs ouvertures, assez étroites, ne livrent guère passage qu'à la quantité d'air nécessaire pour la combustion : ils ne provoquent donc, dans l'atmosphère des pièces où ils sont placés, qu'un renouvellement insuffisant de l'air, en sorte que l'usage en est insalubre, surtout quand les appartements sont petits, ou habités par un grand nombre de personnes. — Les foyers découverts, au contraire, produisent un appel d'air beaucoup plus considérable que celui qui est nécessaire à la combustion. Or cette activité de la ventilation constitue une condition indispensable à réaliser, au point de vue de l'hygiène ; l'expérience a montré qu'il faut toujours, tant pour entretenir la respiration que pour enlever les émanations produites par la transpiration pulmonaire et cutanée, environ 6 à 8 mètres cubes d'air par individu et par heure. — Nos cheminées domestiques sont donc des appareils de chauffage plus coûteux que les poêles, mais aussi plus salubres.

On peut d'ailleurs modifier la construction des foyers découverts, de manière à utiliser une plus forte proportion de la chaleur produite par la combustion : on y parvient, soit en adoptant la disposition connue sous le nom de *cheminée prussienne*, qui fonctionne à la fois comme cheminée et comme poêle, soit en établissant autour du foyer des espaces où arrive l'air du dehors, lequel, après s'être échauffé, vient se rendre dans l'appartement par des ouvertures ou *bouches de chaleur* convenablement installées.

384. **Cheminées.** — Pour qu'une cheminée enlève tous les produits de la combustion effectuée dans le foyer, et pour qu'elle y appelle une quantité d'air au moins égale à celle qui est nécessaire pour la combustion, il faut qu'il s'y établisse un *tirage* suffisant.

Lorsque l'air contenu dans la cheminée est à la même température que l'air extérieur, les pressions qui s'exercent de haut en bas et de bas en haut sur une section horizontale faite à la partie inférieure de la cheminée sont égales, et aucun mouvement ne tend à se produire. Mais, si l'on allume du feu sous la cheminée, la colonne d'air qu'elle contient s'échauffe et acquiert une densité moindre que celle de l'air extérieur ; la section considérée éprouve alors, de bas en haut, un excès de pression qui détermine l'ascension de la colonne tout entière ; la cheminée rejette donc, par la partie supérieure, les produits de la combustion, en même temps qu'un volume d'air égal à celui qui s'écoule passe de la chambre dans la cheminée, et alimente la combustion dans le foyer.

Désignons par h la hauteur verticale de la cheminée, c'est-à-dire, la distance des plans horizontaux passant par ses deux extrémités : par d et d' les densités de l'air extérieur et de l'air intérieur. La différence des pressions exercées sur l'unité de surface d'une section horizontale, faite près de l'orifice inférieur, est $h\,(d-d')$; donc, toutes choses égales d'ailleurs, le tirage doit augmenter avec la hauteur de la cheminée ; c'est en effet ce que l'expérience vérifie. — Cependant, avec un foyer établi dans

des conditions déterminées, il ne faudrait pas augmenter la hauteur de la cheminée au delà d'une certaine limite; car l'air brûlé, se refroidissant à mesure qu'il s'élève, pourrait perdre sa force ascensionnelle avant d'avoir atteint l'orifice supérieur; à partir de ce moment, il ne ferait que ralentir le tirage, à cause des frottements qu'il éprouve contre les parois.

385. **Des causes principales de l'insuffisance du tirage.** — Lorsque le tirage s'établit mal, une partie de l'air brûlé et de la fumée se répand dans l'appartement. — Voici les principales causes qui font fumer les cheminées :

1° *Hauteur insuffisante.* — L'expérience indique 5 mètres comme hauteur minimum à donner à la cheminée; cette hauteur peut être complétée à la partie supérieure, s'il est nécessaire, par des tuyaux qui s'élèvent au-dessus du toit.

2° *Largeur trop grande.* — Dans une cheminée très-large, l'air s'échauffe peu; il s'y établit d'ailleurs des courants ascendants d'air chaud, et des courants descendants d'air froid : ceux-ci entraînent toujours un peu de fumée, qu'ils font refluer dans l'appartement.

3° *Ventilation insuffisante.* — Quand la chambre est trop bien close, l'air extérieur ne peut y pénétrer, pour remplacer celui qui passe dans la cheminée; il en résulte dans la chambre une raréfaction de l'air, qui n'exerce plus alors sur l'orifice de la cheminée une pression suffisante pour soulever la colonne d'air chaud. Cette colonne cesse de monter, ou même reflue en entraînant de la fumée.

4° *Action réciproque de deux cheminées.* — Si deux chambres, contenant chacune une cheminée, communiquent entre elles, le tirage de la cheminée dans l'une des pièces raréfie l'air dans l'autre; il en résulte que, dans celle-ci, il se produit le plus souvent de la fumée. — Dans ces deux derniers cas, il faut recourir aux *ventouses* ou aux *vasistas*.

5° *Vent.* — Le vent peut, dans certains cas, occasionner de la fumée; s'il est horizontal ou faiblement incliné, il n'exerce en général que peu d'influence sur le tirage; s'il a une direction descendante, ou s'il est très-énergique, il peut refouler l'air chaud, ou en empêcher partiellement la sortie. — Pour éviter ces effets, on coiffe les cheminées, à leur partie supérieure, de *mitres* de tôle ou de maçonnerie.

386. **Chauffage des grands établissements.** — Le chauffage par les cheminées et les poêles nécessite un appareil spécial pour chaque pièce à chauffer; il a le grand inconvénient d'exiger des soins, de la surveillance, et une grande dépense de combustible. Aussi, dans la plupart des grands établissements, préfère-t-on installer un système général de chauffage, qui offre plus d'économie et plus de régularité. Les dispositions usitées se rapportent à trois types principaux : 1° chauffage par l'air chaud; 2° chauffage par circulation d'eau chaude; 3° chauffage par la vapeur.

387. **Chauffage par l'air chaud.** — Le système de chauffage par l'air chaud consiste à introduire dans les pièces de l'air préalablement échauffé dans des tuyaux qui traversent un calorifère. Il s'établit dans ces tuyaux un tirage continu, analogue à celui des cheminées, en vertu duquel l'air chaud s'élève jusque dans les appartements, tandis qu'il est remplacé par de l'air froid venu du dehors. — Ce mode de chauffage n'est avantageux que si l'air échauffé n'a pas un long trajet à parcourir avant d'arriver aux pièces dans lesquelles il doit être distribué.

388. **Chauffage par circulation d'eau chaude.** — L'appareil se compose essentiellement : 1° d'une chaudière A (*fig.* 264), placée dans les caves ; 2° d'un tuyau d'ascension BC, partant du sommet de la chaudière et débouchant dans un réservoir D établi dans les combles ; 3° d'une première série de tuyaux descendants *efg*, *hil*, qui distribuent l'eau du réservoir D dans des poêles E, F ; 4° d'une deuxième série de tuyaux descendants *mno*, *rst*, qui ramènent l'eau des poêles à la chaudière.

La chaudière A est ordinairement en forme de cloche, et à foyer intérieur ; elle doit présenter une surface de chauffe aussi grande que possible ; elle est entièrement pleine d'eau, de même que le réservoir D, les poêles et les tuyaux. Le réservoir D, qu'on nomme *vase d'expansion*, est muni d'une soupape *s* analogue à celle de la marmite de Papin (*fig.* 255) ; cette soupape sert à livrer passage à l'air qui se dégage de l'eau sous l'influence de la chaleur, et à régler la pression dans l'intérieur de l'appareil. Chacun des poêles E, F, est formé de deux cylindres de fonte parallèles : l'espace compris entre les deux cylindres renferme de l'eau ; le cylindre intérieur est une sorte de cheminée, dans laquelle s'échauffe l'air amené du dehors par des tuyaux placés sous le plancher.

Fig. 264.

Lorsqu'on fait du feu sous la chaudière, l'eau chaude monte dans le tuyau BC, et gagne la partie supérieure du vase d'expansion ; en même

temps, le liquide plus froid dont elle prend la place descend par les tubes *efh*, *hil*, et se rend aux poêles; ordinairement, un même tube descendant alimente tous les poêles d'un même étage. Enfin, la circulation se complète par les tubes *mno*, *rst*, qui ramènent l'eau à la chaudière. — Il est facile de voir que, au bout d'un certain temps de chauffe, le liquide aura atteint dans le circuit total une température assez élevée ; en outre, dans chaque partie de ce circuit, le liquide le plus froid sera sans cesse remplacé par du liquide plus chaud.

L'eau étant le corps qui a la plus grande chaleur spécifique (571) abandonne, pour un même abaissement de température, plus de chaleur qu'un égal poids de tout autre corps. On s'explique ainsi comment l'eau, bien qu'à une température notablement inférieure à 100° dans les poêles à eau chaude, peut facilement céder à l'air et aux parois des appartements, soit par contact, soit par rayonnement, une quantité de chaleur suffisante pour obtenir la température voulue.

Les appareils de chauffage par circulation d'eau chaude présentent le grand avantage d'entretenir dans les pièces une température douce et constante. Ils exigent peu de soins et de surveillance; en effet, des variations même assez grandes dans l'activité du foyer n'ont presque pas d'influence sur la température moyenne de l'eau chaude, à cause de son grand volume. -- Ces appareils sont d'un prix élevé, en raison de la résistance considérable que doivent avoir toutes leurs parties, pour supporter les pressions énormes qu'elles éprouvent de la part de l'eau.

389. **Chauffage par la vapeur.** — On utilise fréquemment aussi, pour le chauffage des grands établissements, la chaleur que dégage la vapeur en se condensant. Les appareils employés dans ce but offrent une disposition peu différente des précédents; ils se composent toujours : 1° d'une chaudière où se produit la vapeur; 2° de tuyaux qui conduisent la vapeur dans les poêles où elle doit être condensée; 3° de poêles à condensation ; 4° de tuyaux destinés à ramener à la chaudière l'eau qui provient de la liquéfaction de la vapeur, ou à l'évacuer au dehors. — L'efficacité de ce mode de chauffage résulte surtout de la grande quantité de chaleur latente qu'abandonne la vapeur au moment de sa liquéfaction (381).

II. — CHAUDIÈRES A VAPEUR

390. **Des moteurs à vapeur, en général.** — Un moteur à vapeur comprend, en général : d'une part, un *générateur* qui produit la vapeur à une température plus ou moins élevée ; d'autre part, une *machine* dans laquelle la tension de cette vapeur est utilisée pour produire un mouvement, qui est ensuite transmis à divers organes. — Nous considérerons plus particulièrement les moteurs où l'on emploie la *vapeur d'eau*.

Nous indiquerons d'abord les dispositions les plus usitées des généra-

teurs, en prenant comme type la *chaudière à bouilleurs*, qui est la plus employée pour alimenter les machines fixes.

391. **Chaudière à bouilleurs.** — Une chaudière à bouilleurs se compose essentiellement d'un gros cylindre horizontal A (*fig.* 265 et 266),

P

Fig. 265. — Chaudière à bouilleurs.

qui est le *corps* de la chaudière, et de deux cylindres plus petits N, N, qui sont les *bouilleurs :* la communication entre le corps et les bouilleurs est établie par une paire de tubulures M, ou *évents*. L'eau remplit les bouilleurs et une partie du corps, comme le montrent les figures : elle est chauffée par la flamme et les gaz de la combustion, qui se dégagent d'une grille *o* située au-dessous de l'une des extrémités de la chaudière. — Pour augmenter la surface par laquelle la chaudière reçoit la chaleur due à la combustion, on emploie la disposition suivante. Une voûte horizontale, construite au niveau de l'axe des bouilleurs, partage tout le fourneau en deux étages (*fig.* 266), et l'étage supérieur est lui-même divisé en deux galeries, par une cloison longitudinale qui n'est interrompue qu'à son extrémité la plus voisine du foyer. La flamme et les gaz chauds qui viennent du foyer, après avoir parcouru une première fois toute la longueur du fourneau d'avant en arrière, dans l'étage inférieur (*premier carneau*), reviennent d'arrière en

Fig. 266.

avant par l'un des compartiments ménagés dans l'étage supérieur (*deuxième carneau*), et enfin retournent par l'autre compartiment (*troisième carneau*) vers la cheminée qui leur donne issue. On voit donc que, dans le premier carneau, ce sont les bouilleurs qui reçoivent l'action de ces gaz; dans le second et le troisième carneau, qu'on comprend quelquefois sous le nom de *retours de flamme*, c'est le corps même de la chaudière qui est chauffé. — L'ensemble de toutes ces parties, avec lesquelles la flamme ou les gaz viennent en contact, constitue la *surface de chauffe*.

392. **Appareils indicateurs du niveau, dans les chaudières.** — Il est indispensable que le niveau de l'eau dans une chaudière ne s'abaisse jamais au-dessous de la limite supérieure de la surface de chauffe. En effet, une portion de paroi qui serait en contact avec la flamme par sa surface extérieure, et qui, pendant quelque temps, ne serait pas en contact avec l'eau par sa surface intérieure, pourrait rougir; quand on viendrait ensuite à faire remonter le niveau par l'introduction d'une nouvelle quantité d'eau, il y aurait production brusque d'une énorme quantité de vapeur, et danger imminent d'explosion. Le chauffeur doit donc avoir des moyens de vérifier, à chaque instant, la position du niveau à l'intérieur de sa chaudière.

L'un des plus simples consiste dans l'emploi d'un tube vertical de cristal, situé en dehors de la chaudière et dont les extrémités communiquent, l'une avec la partie inférieure du corps de la chaudière, l'autre avec sa partie supérieure : tel est le tube représenté en *o*, sur le côté de la chaudière, dans la figure 303. Ce tube forme ainsi avec la chaudière un système de vases communiquants, et le niveau de l'eau s'y place sur le même plan horizontal que dans la chaudière.

On emploie également un flotteur I (*fig.* 265), fixé à l'extrémité d'une chaine qui passe sur une poulie extérieure F, et se termine par un contre-poids : l'axe de la poulie porte une aiguille, dont la position indique celle du niveau de l'eau à l'intérieur. — Enfin, au moyen d'une disposition particulière, on fait quelquefois en sorte qu'un flotteur analogue, si le niveau vient à descendre trop bas, ouvre une petite soupape, par laquelle la vapeur s'échappe en faisant résonner un *sifflet d'alarme*.

393. **Soupape de sûreté.** — Les soupapes de sûreté, disposées de manière qu'elles donnent issue à la vapeur lorsque sa tension devient supérieure à celle que la chaudière peut supporter sans danger d'explosion, sont tout à fait semblables à celle qui est employée dans la marmite de Papin (*fig.* 235). Les règlements exigent que chaque chaudière soit munie de deux soupapes de sûreté au moins : chacune d'elles doit avoir une section suffisante pour que, une fois ouverte, *à elle seule* et quelle que soit l'activité du feu, elle maintienne la tension de la

vapeur à une valeur inférieure à la limite déterminée par la résistance de la chaudière. La figure 265 montre la position de deux de ces soupapes B, G.

394. **Manomètres.** — Pour ce qui concerne les manomètres destinés à évaluer la pression de la vapeur, nous renvoyons à ce qui a été précédemment dit (143 à 146) : les manomètres métalliques (146) sont aujourd'hui presque exclusivement employés.

395. **Chaudières à foyer intérieur.** — La figure 267 représente la coupe transversale d'une chaudière appartenant à un système très-répandu en Angleterre, où le foyer est placé à l'intérieur du corps lui-même. La chaudière, formée d'un gros cylindre A, qui parfois n'a pas moins de 10 à 12 mètres de longueur, contient, ainsi que le montre la figure, un autre cylindre plus petit B, qui est environné de toutes parts par l'eau. C'est à l'entrée de ce cylindre intérieur que se trouve la grille, et il constitue ainsi un premier carneau intérieur, parcouru par la flamme; les gaz sont ensuite ramenés en avant par un second carneau C, placé au-dessous de la chaudière, et enfin ils reviennent à la cheminée par deux carneaux latéraux, D, D', entre lesquels ils se divisent. — Pour augmenter encore la surface de chauffe, on place ordinairement au milieu du carneau intérieur un tube bouilleur, mis en communication avec le corps de la chaudière.

Fig. 267. — Chaudière à foyer intérieur.

396. **Chaudières tubulaires.** — L'emploi des chaudières tubulaires a pour objet d'augmenter beaucoup la surface de chauffe, sans augmenter le volume de la chaudière : l'idée première en est due à M. Marc Séguin, en 1826. Une chaudière tubulaire n'est guère qu'une chaudière à foyer intérieur, comparable à celle qui vient d'être décrite, dont le carneau intérieur serait remplacé par un grand nombre de tubes horizontaux, traversant la chaudière d'avant en arrière et laissant tous passage à la flamme et à la fumée dans le même sens.

La figure 268 représente la section longitudinale de la chaudière tubulaire, telle qu'elle a été appliquée en 1829 aux locomotives par Robert Stephenson : elle offre en effet, dans ce cas particulier, des avantages pour lesquels elle ne peut être remplacée par aucun autre système. — Le foyer M, placé à l'arrière de la locomotive, est environné d'eau, comme le

montre la figure : c'est un veritable *foyer intérieur*, interrompu seule-

Fig. 268. — Locomotive : coupe longitudinale de la chaudière.

ment par une porte *g* destinée au chargement du combustible. La flamme et les gaz traversent la chaudière par 120 à 150 tuyaux, disposés

dans toute la longueur du *corps* NN. — On active le tirage en laissant échapper la vapeur, après qu'elle a été employée à produire le mouvement de la machine, par des tubes Q qui s'ouvrent à la base de la cheminée.

La vapeur formée dans la chaudière se rend dans un *dôme* O, à la partie supérieure duquel elle est prise par un tuyau PP qui la conduit à la machine. Ce tuyau PP, environné extérieurement de vapeur dans toute sa longueur (*fig.* 269), a pour objet d'empêcher que la vapeur contienne une trop grande proportion de gouttelettes liquides entraînées. L'admission de la vapeur du dôme dans le tube P se fait par une sorte de clef U, disposée à peu près comme les plaques étoilées dont on garnit les bouches de chaleur des calorifères. C'est ce qu'on nomme la *prise de vapeur* : le chauffeur la manœuvre au moyen de la manette T (*fig.* 268).

Fig. 269.

III. — MACHINES A VAPEUR

397. Organes principaux d'une machine à vapeur, en général. — Avant d'aborder l'étude des différentes parties des machines à vapeur et des détails qui distinguent entre elles les diverses espèces de machines employées, il est nécessaire d'indiquer, d'une manière générale, les organes essentiels de ces machines. C'est ce que nous ferons en prenant une machine-type, qui se rapproche surtout de la machine de Watt, ou *machine à balancier*. On a construit, comme nous l'indiquerons plus loin, des machines dont les organes présentent une simplicité plus grande, mais c'est la machine de Watt qu'il importe de bien connaître d'abord : quelques mots suffiront ensuite pour les autres systèmes.

Du générateur, la vapeur est amenée, par des conduits, dans un cylindre A (*fig.* 270) dans lequel peut se mouvoir un piston. Supposons que la vapeur arrive *alternativement* en dessous et en dessus du piston ; supposons, en outre, que, à l'instant où la vapeur arrive au-dessous du pis-

ton, celle qui était primitivement en dessus puisse s'échapper, et réciproquement. La force élastique de la vapeur imprimera au piston un mouvement rectiligne alternatif : on cherche d'ordinaire à transformer ce mouvement en un mouvement circulaire continu, imprimé à un arbre qui met lui-même en mouvement tous les organes de l'usine. — Dans la machine à balancier, cette transformation de mouvements s'effectue de la manière suivante :

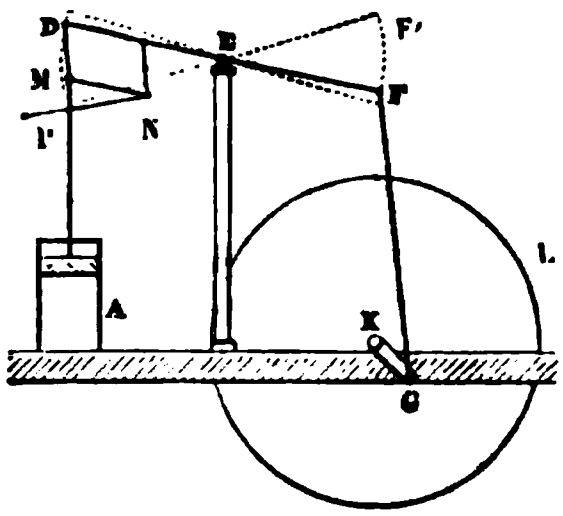


Fig. 270.

La tige qui est fixée au piston, glissant à frottement doux dans une boîte à cuir située à l'extrémité supérieure du cylindre, vient se lier à l'extrémité d'un *balancier* DF mobile autour de son milieu E; cette liaison se fait par l'intermédiaire d'un parallélogramme de tiges métalliques, dit *parallélogramme articulé*, et destiné à éviter les flexions alternatives qu'éprouverait la tige, pendant le mouvement du balancier, si elle était articulée directement elle-même au point D. Les quatre côtés de ce parallélogramme sont en effet articulés entre eux à leurs extrémités, en sorte que leurs angles puissent varier sans que les longueurs des côtés varient : le sommet N, opposé à l'extrémité D du balancier, est relié à un point fixe P par une tige rigide, qui est mobile elle-même autour de P, de sorte que N est assujetti à décrire un arc de cercle autour de P; ce mode de liaison, imaginé par Watt, a pour résultat, comme la théorie le démontre, de faire décrire sensiblement une ligne droite à l'extrémité M de la tige du piston, l'extrémité D du balancier décrivant un arc de cercle. Le mouvement de va-et-vient du piston fait ainsi décrire au point F l'arc de cercle FF', alternativement dans un sens et dans l'autre : le point F est réuni à l'extrémité d'une *manivelle* KG par l'intermédiaire d'une *bielle* FG, et l'on voit sans peine que la manivelle est ainsi animée d'un mouvement de rotation continu autour de son axe K. Cet axe est celui de l'arbre moteur de l'usine, et sur cet arbre est fixé un *volant* L, c'est-à-dire une roue de fonte, ayant un rayon considérable et un poids très-grand à sa circonférence : le volant est entraîné dans le mouvement et sert à le régulariser, comme on le verra plus loin.

Lorsque la vapeur arrive, comme nous l'avons supposé, alternativement d'un côté et de l'autre du piston, la machine est dite *à double effet* (*).

(*) On appelle, par opposition, machine *à simple effet*, celle dans lesquelles la vapeur arrive d'un côté seulement du piston, et d'une manière intermittente. — Telle était, par exemple, la première machine à vapeur, imaginée par Denis Papin au dix-septième siècle, et réalisé seulement vers 1705 par Cayley, Newcomen et Savery.

Dans la machine connue sous le nom de *machine de Newcomen*, la vapeur arrivant à

398. **Du condenseur.** — L'emploi du condenseur dans les machines à vapeur est dû à Watt; pour en comprendre l'utilité, nous examinerons d'abord le jeu d'une machine *sans condenseur*.

Supposons que, à un moment donné, la vapeur arrive dans le cylindre au-dessous du piston, par le tube *t* (*fig.* 271); à ce même instant, l'espace C, au-dessus du piston, doit être mis en communication avec l'atmosphère par le tube *t'*, afin que la vapeur primitivement arrivée dans cet espace puisse s'échapper librement. Dès lors, le piston est sollicité de bas en haut par une force égale à la différence des pressions exercées sur ses deux faces, d'un côté par la force élastique de la vapeur, de l'autre par la pression atmosphérique. — Quand le piston parvient au haut de sa course, une disposition qui sera décrite plus loin intervertit les communications; la vapeur de la chaudière arrive maintenant par *t'*, et celle qui était contenue en D s'échappe par *t* dans l'atmosphère : le piston est donc sollicité de haut en bas par une force égale en grandeur à la précédente.

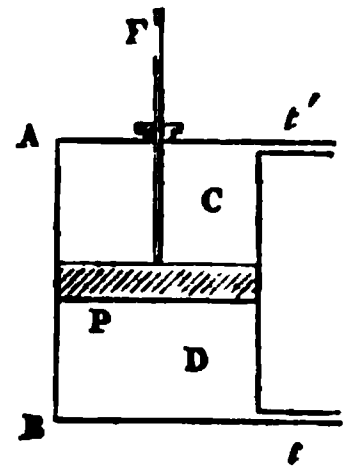


Fig. 271.

En faisant ainsi échapper la vapeur dans l'atmosphère, on fait intervenir la pression atmosphérique comme une force résistante, diminuant à chaque instant la force motrice qui agit sur le piston. — Cette perte est presque entièrement supprimée par l'emploi du *condenseur*, comme nous allons le montrer.

Le condenseur est une enveloppe métallique fermée, et vide d'air, dans laquelle pénètre, sous forme de pluie, un jet continu d'eau froide; quand la vapeur de la chaudière arrive par le tube *t*, le tube *t'* est mis en communication, non plus avec l'atmosphère, mais avec le condenseur. Or, si la température moyenne dans le condenseur est de 45°, la force élastique de la vapeur d'eau y sera seulement d'un dixième d'atmosphère environ. On voit donc que la vapeur contenue dans l'espace C, sous une pression primitivement égale à celle de la chaudière, afflue dans le condenseur où elle doit se liquéfier, jusqu'à ce que la tension dans cet espace ne soit plus que d'un dixième d'atmosphère; le phénomène de l'abaissement de la pression est d'ailleurs tellement instantané qu'on peut considérer la force résistante comme étant toujours exprimée par la pression d'un dixième d'atmosphère, c'est-à-dire *par la force élastique de la vapeur d'eau*

la partie inférieure d'un cylindre vertical soulevait un piston contenu dans ce cylindre. Lorsque le piston était au haut de sa course, on interrompait l'arrivée de la vapeur, et on refroidissait extérieurement le cylindre : la pression sous le piston s'abaissant alors à une valeur très-faible, la pression atmosphérique entraînait le piston vers la partie inférieure du cylindre; ce mouvement était transmis par un balancier à la maîtresse tige d'une série de pompes, destinées à l'épuisement des galeries de mines.

correspondante à la température des parties les plus froides de l'espace où elle est contenue. C'est le principe connu sous le nom de *principe de Watt*. — L'utilité du condenseur est donc manifeste.

399. **De la détente.** — Lorsque le cylindre est mis en communication avec la chaudière par l'une de ses extrémités pendant toute la course du piston, on laisse échapper, à la fin de la course, un volume de vapeur égal à celui du cylindre, et avec une tension égale à celle qui règne dans la chaudière. — Watt a eu l'idée de ne laisser arriver la vapeur de la chaudière dans le cylindre que pendant *une partie de la course* du piston : en interceptant alors le tube d'arrivée, on laisse cette vapeur augmenter de volume, *se détendre* : sa force élastique va en diminuant ; mais, pourvu que l'accroissement de volume ne soit pas trop considérable, elle continue toujours à agir comme une force motrice, supérieure à la pression qui s'exerce sur l'autre face du piston.

L'économie qu'on trouve dans l'emploi de la *détente* peut se calculer d'une manière rigoureuse : nous nous contenterons de faire concevoir que cette économie est réelle. — Supposons que, dans une machine munie d'un condenseur, la force élastique de la vapeur dans la chaudière soit de 2 atmosphères, et que, à chaque coup de piston, on laisse la vapeur arriver dans le cylindre pendant la première moitié seulement de la course. On ne dépensera, pour le même nombre de coups de piston, que la moitié de la vapeur qu'on aurait dépensée sans détente ; mais, d'autre part, l'effet sur le piston n'aura pas été réduit de moitié, car on aura eu d'abord la force motrice de 2 atmosphères, agissant pendant toutes les premières moitiés de la course du piston ; on aura eu, en outre, pendant toutes les secondes moitiés de la course, une force motrice variable entre 2 atmosphères et 1 atmosphère, par conséquent toujours supérieure à la force résistante qui s'exerce sur l'autre face. Il y aura donc augmentation de l'effet produit, pour une même dépense de vapeur.

L'immense majorité des machines aujourd'hui employées fonctionne avec détente : on ne fait presque plus jamais usage du travail à pleine pression pendant toute la course du piston. — On emploie très-fréquemment les *degrés de détente* $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{10}$, c'est-à-dire qu'on laisse arriver la vapeur pendant le cinquième, le dixième de la course du piston. Enfin, avec des machines présentant une grande perfection, on a pu avec avantage employer la détente à $\frac{1}{25}$ et même à $\frac{1}{30}$.

400. **Distribution de la vapeur dans le cylindre. Tiroir.** — Les communications du cylindre avec la chaudière doivent être établies, comme on l'a vu, de façon que, l'une des extrémités du cylindre communiquant avec la chaudière, l'autre communique avec le condenseur ou l'atmosphère, et ces communications doivent être alternativement interverties, à chaque course du piston dans un sens ou dans l'autre. — Ces

conditions ont été simultanément réalisées à l'aide d'un dispositif extrêmement ingénieux, qui porte le nom de *tiroir*.

La vapeur arrive de la chaudière, par le tube F, dans une capacité FG (*fig.* 272), fixée sur la partie latérale du cylindre : c'est la *boîte à vapeur*. Dans l'épaisseur de la paroi du cylindre sur laquelle cette boîte est appliquée, sont creusés deux conduits *a*A, *b*B, qui viennent aboutir chacun à l'une des extrémités du cylindre. Enfin, dans cette même paroi est creusé un autre conduit, dont la figure ne représente que l'entrée K, et qui va aboutir dans le condenseur. Les centres des orifices *a*, K, *b* de ces trois canaux sont situés sur une même génératrice du cylindre. Dans la boîte à vapeur est placé le *tiroir mn*, mis en mouvement par une tige E qui passe dans une boîte à étoupes et qui est mue elle-même par la machine : cette pièce, dont les figures ci-dessus n'indiquent que la section, a exactement la forme de nos tiroirs ordinaires, c'est-à-dire qu'elle peut être comparée à une boîte rectangulaire, qui manquerait de l'une de ses faces, de celle précisément qui s'appliquerait sur la surface extérieure du cylindre. — Le mouvement de la tige E est réglé de façon que, quand le piston est au haut de sa course, le tiroir se place dans la position indiquée par la première figure : la vapeur qui vient de la chaudière peut passer de la boîte dans la partie supérieure du cylindre, par le conduit *a*A dont l'orifice *a* est libre : au contraire, la vapeur qui se trouvait au-dessous du piston peut passer par le conduit B*b* dans l'intérieur du tiroir, et de là, par le conduit K, dans le condenseur. Le piston se met alors en mouvement de haut en bas. — Quand le piston est arrivé au bas de sa course, la tige E amène le tiroir dans la position indiquée par la seconde figure : la vapeur passe alors de la boîte à vapeur dans le conduit *b*B et dans la partie inférieure du cylindre, et la vapeur qui se trouvait au-dessus du piston peut s'échapper par le conduit A*a* dans le tiroir, et de là, par le conduit K, dans le condenseur : le piston se met alors en mouvement de bas en haut.

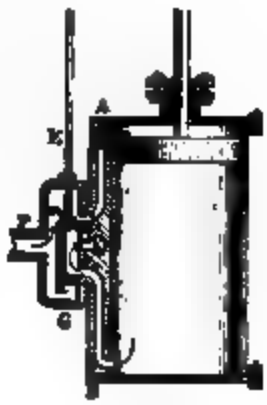


Fig. 272.

Lorsque la machine doit marcher avec détente, on règle la marche ou les dimensions du tiroir de manière que l'arrivée de la vapeur dans le cylindre soit interceptée, pendant la course du piston, avant que la communication de l'autre partie du cylindre avec le condenseur soit interrompue.

401. **Machines à basse pression, à moyenne pression, et à haute pression.** — Au point de vue de la valeur de la tension sous laquelle la vapeur arrive de la chaudière, on distingue les machines en trois groupes :

1° Les machines à *basse pression*, dans lesquelles la tension de la vapeur ne dépasse pas une atmosphère et demie. — L'emploi du condenseur est particulièrement nécessaire dans ces machines, afin que la vapeur conserve une action suffisante sur le piston.

2° Les machines à *moyenne pression*, dans lesquelles la tension est de 3 à 5 atmosphères.

3° Les machines à *haute pression*, où la tension de la vapeur dépasse 5 atmosphères. — Dans ces machines, il y a en général avantage à supprimer le condenseur, parce que, en perdant une atmosphère comme force motrice, on évite la dépense de travail nécessaire pour renouveler incessamment l'eau du condenseur et pour en extraire l'air dégagé par l'eau qui y est injectée, dépense qui serait ici considérable.

402. **Cheval-vapeur.** — On exprime, en général, la puissance des machines en indiquant ce qu'on nomme leur *force en chevaux*. C'est là une expression toute conventionnelle, dont il faut connaître la signification.

On dit qu'une machine vaut un *cheval*, lorsqu'elle est capable d'effectuer un travail de 75 kilogrammètres par seconde, c'est-à-dire d'élever, par seconde, 75 kilogrammes à 1 mètre de hauteur. Une machine vaut 2, 3 chevaux, lorsqu'elle est capable d'effectuer, par seconde, un travail de 2, 3 fois 75 kilogrammètres.

Cette unité, qu'on nomme le *cheval-vapeur*, diffère en réalité beaucoup de la puissance d'un cheval ordinaire. En d'autres termes, la puissance d'une machine en chevaux-vapeur ne représente nullement le nombre de chevaux qu'il faudrait employer effectivement pour remplacer la machine elle-même. Ainsi, un cheval attelé à un manége, de manière que sa force de traction soit employée à imprimer un mouvement de rotation à un arbre, effectue, pendant les heures où il est attelé, un travail qui ne dépasse pas 42 kilogrammètres par seconde ; en sorte que, pendant ce temps, sa puissance est à celle du cheval-vapeur dans un rapport qui est un peu supérieur à $\frac{1}{2}$. Mais, si l'on tient compte, en outre, du repos qu'il est indispensable de lui laisser prendre, et qu'on calcule son travail moyen en divisant son travail journalier par le nombre de secondes du jour tout entier, on trouve que sa puissance est à celle du cheval-vapeur dans le rapport $\frac{1}{5,5}$, c'est-à-dire que, pour faire fonctionner d'une manière continue une machine ayant une puissance de 10 chevaux-vapeur, il faudrait employer 55 chevaux ordinaires, fonctionnant d'une manière alternative.

403. **Organes régulateurs du mouvement. — Volant et régulateur à boules.** — Le plus ordinairement, les résistances que doit vaincre une machine varient d'un instant à l'autre, et parfois d'une manière brusque : c'est ainsi, par exemple, qu'une machine à vapeur employée à faire fonctionner les diverses machines-outils d'un atelier éprouve

des résistances variables, selon qu'on met en communication avec l'arbre

Fig. 213. — Machine de Watt.

de couche un nombre plus ou moins grand de ces outils, ou que chacun d'eux est appliqué à des matériaux plus ou moins résistants. Or le *volant*

L (*fig.* 270 et 273), qui est monté sur l'arbre de couche, a une masse très-considérable à sa circonférence, masse qui participe au mouvement de la machine. On conçoit donc que, si l'on vient à introduire brusquement dans le système une résistance nouvelle, la vitesse acquise par le volant ne peut cependant se ralentir que d'une manière successive et sans choc appréciable. Au contraire, si l'on supprime brusquement l'une des résistances qui existaient dans ce système, l'excès de travail moteur qui devient disponible est employé à accélérer le mouvement, mais cette accélération est toujours petite, à cause de la grandeur même de la masse à faire mouvoir. — On peut donc considérer le volant comme ayant pour effet d'emmagasiner, en quelque sorte, toute différence positive ou négative intervenant brusquement entre le travail moteur et le travail résistant; il doit rendre toujours très-petites les variations de vitesse qui peuvent se produire dans un petit intervalle de temps.

Mais si le travail moteur l'emporte, d'une manière continue et pendant longtemps, sur le travail résistant, les accélérations successives que reçoit le système tout entier s'ajoutant les unes aux autres, la vitesse finit par devenir très-grande, et la machine *s'emporte*, malgré la présence du volant. — C'est pour parer à cet autre inconvénient qu'on emploie des appareils régulateurs, parmi lesquels nous décrirons seulement le régulateur à boules.

Le *régulateur à boules* (*fig.* 274), imaginé par Watt, se compose d'un système de deux sphères pesantes P, P, fixées à l'extrémité de deux tiges métalliques articulées en A à l'extrémité de la tige verticale B. Le mouvement de rotation de l'arbre de la machine est transmis, par l'intermédiaire d'une courroie sans fin *tt* (*fig.* 273) et des roues d'angle T, à la tige B, en sorte que les boules tendent à s'écarter de cette tige, d'autant plus que la vitesse de rotation est plus grande : elles soulèvent alors, par l'intermédiaire des tiges articulées AD, DC (*fig.* 274), une bague CC qui glisse librement le long de B; l'extrémité G du levier coudé EFG tire alors horizontalement la tige GH, laquelle agit à son tour comme le montre la figure 273 et tend à fermer une valve *a*, placée sur le tuyau d'arrivée de la vapeur au cylindre. Au contraire, quand le mouvement de la machine se ralentit, le poids des boules P tend à les rapprocher de la tige B et la bague CC descend; la valve *a* s'ouvrant davantage, l'arrivée de vapeur augmente, et la quantité de travail moteur augmente également.

Fig. 274.

404. Pompes adjointes à la machine. — Dans les machines à condenseur, on trouve un système de trois pompes destinées à entretenir une sorte de circulation de l'eau, indispensable à la marche régulière et économique de la machine. Ce système de pompes devra : 1° amener continuellement une pluie d'eau froide dans la chambre à condensation : c'est le rôle de la *pompe à eau froide;* 2° enlever de cette chambre l'eau qui s'y est échauffée par la condensation de la vapeur, et l'air que la diminution de pression a dégagé de l'eau : c'est le rôle de la *pompe à air;* 3° prendre une partie de cette eau déjà tiède, pour alimenter la chaudière à vapeur : c'est le rôle de la *pompe d'alimentation.* — Ces trois pompes sont mises en mouvement par la machine elle-même : la figure 275 montre comment leurs tiges sont liées au balancier, et la figure 273 indique la coupe des diverses capacités dans lesquelles elles mettent l'eau en mouvement.

La *pompe à eau froide q* va puiser l'eau dans un puits ou dans un cours d'eau, et la verse en *r* dans un vaste réservoir RRR, où plongent toutes les autres parties, et qui doit être toujours plein d'eau. Cette eau, environnant le condenseur *e*, contribue à le refroidir : la vapeur qui arrive du cylindre par le conduit *d* se condense en partie et sa force élastique descend à une valeur qui est, comme nous l'avons vu, généralement d'un dixième d'atmosphère environ (398). La différence entre la pression atmosphérique et cette pression intérieure est donc plus que suffisante pour déterminer l'arrivée continue de l'eau du réservoir R dans le condenseur, par le conduit *g* dont on règle le débit au moyen d'un robinet.

La *pompe à air h* aspire l'eau chaude du condenseur : cette eau franchit les soupapes *i*, *i* du piston, et est déversée dans un petit réservoir *l*.

La *pompe d'alimentation m* aspire une partie de cette eau chaude par le conduit *nn* et la soupape *o*, et la refoule ensuite, par la soupape *o'* et le conduit *p*, jusque dans la chaudière, où elle sert à remplacer l'eau qui s'y est convertie en vapeur.

405. Mouvement du tiroir. — Excentrique circulaire. — La concordance qui doit exister entre les mouvements du tiroir et ceux du piston est obtenue d'une manière rigoureuse en faisant exécuter les mouvements du tiroir par l'arbre lui-même. L'*excentrique circulaire* est l'une des dispositions les plus fréquemment employées pour cet objet.

L'arbre K (*fig.* 273) porte un disque circulaire P, monté excentriquement, c'est-à-dire dont le centre n'est pas situé sur l'axe de l'arbre : le contour de ce disque est embrassé par un collier Q dans lequel il peut glisser : enfin, l'anneau lui-même est relié aux tiges *s*, *s*, qui viennent s'articuler en *t* avec l'une des branches du levier coudé *tuv*. Pendant le mouvement de l'arbre K, les points de l'excentrique qui sont le plus éloignés de l'axe sont reportés, tantôt vers la droite de l'axe K, comme l'indique la figure 273, tantôt vers la gauche, quand l'axe a tourné d'un demi-tour : par suite, le collier Q entraîne les tiges *s* et le point *t* successivement vers la droite et vers la gauche. Le levier coudé *tuv* est articulé

en v avec la tige verticale x qui dirige le tiroir et l'on voit que le mouvement de droite à gauche du point t produit un mouvement de bas en haut du tiroir, tandis que le mouvement de gauche à droite du point t produit un mouvement de haut en bas du tiroir. Comme d'ailleurs, à chaque tour de l'arbre K, correspond une allée et venue du piston, on voit que les rapports de position du piston et du tiroir, une fois établis convenablement, doivent se conserver indéfiniment.

406. **Divers types de machines se distinguant entre eux par la disposition des organes de transmission.** — Les descriptions qui précèdent ont été données en prenant comme exemple le type de la machine de Watt, dans lequel la transmission du mouvement des pistons à l'arbre se fait par l'intermédiaire d'un *balancier*, d'une *bielle* et d'une *manivelle* (*fig.* 273 et 275). Ce type particulier, dont les divers modèles

Fig. 275. — Machine de Watt.

ont en général l'avantage de présenter une grande régularité dans la marche, se prête à une solidité d'installation qui permet de n'avoir que rarement recours à des réparations, toujours fâcheuses pour le service de la machine (*). En revanche, la complication de la construction et la

(*) On parvient à une régularité beaucoup plus grande encore par l'emploi de deux cylindres d'inégales dimensions, accouplés l'un à l'autre et agissant sur la même extrémité du balancier : l'emploi de ce système de cylindres a pour but de faire que la vapeur, après avoir agi sur le petit piston de manière à produire, par exemple, le

grandeur de l'espace dont il faut pouvoir disposer constituent souvent des difficultés qui ont conduit à des dispositions plus simples.

On désigne sous le nom général de *machines à action directe* celles dans lesquelles, en supprimant le balancier, on articule directement la tige du piston avec la bielle, et quelquefois même avec la manivelle de l'arbre Ces machines à action directe présentent trois variétés principales : la machine *verticale*, la machine *horizontale* et la machine *oscillante*.

407. **Machine verticale à action directe.** — La figure 276 représente les détails principaux d'une machine verticale à action directe : la partie supérieure de la tige du piston s'articule directement, comme on voit, à la bielle D, qui s'articule elle-même avec la manivelle E de l'arbre sur lequel est monté le volant. Il faut remarquer ici que, la tige du piston devant subir des efforts latéraux de la part de la bielle, on a dû assujettir son extrémité supérieure dans une traverse solide B, qui se meut entre les deux glissières C, C; ces deux glissières, solidement fixées, s'opposent à toute flexion qui tendrait à se produire sur la tige.

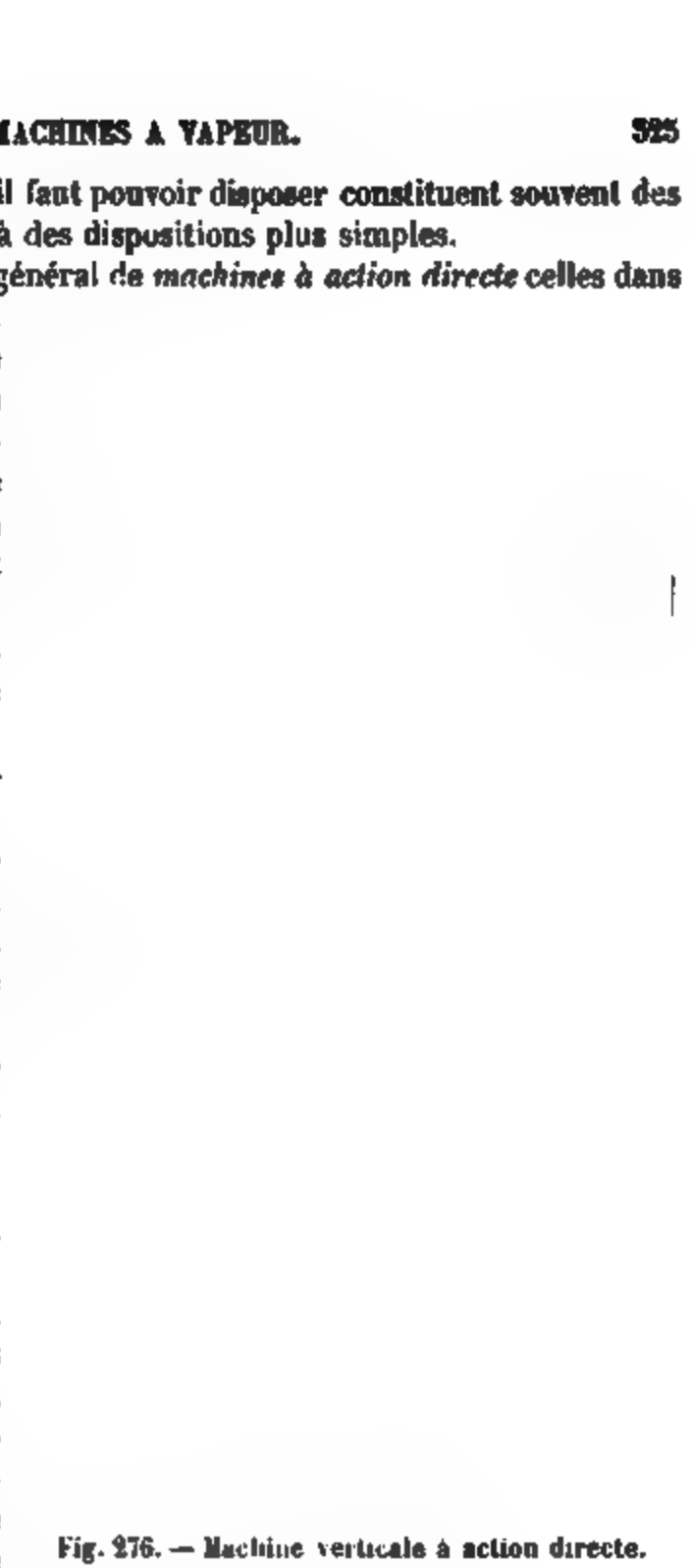


Fig. 276. — Machine verticale à action directe.

mouvement d'ascension, passe successivement du petit cylindre dans le grand, au-dessus du piston de ce cylindre, à mesure que le mouvement se produit en sens contraire. C'est là, comme on voit, une véritable détente de la vapeur, qui produit un travail s'ajoutant au travail effectué par la vapeur quand elle agit sur le petit piston. — Dans ces machines, dites *machines de Woif*, les inégalités dans la production du travail sont beaucoup moins marquées que dans les machines simples : ce sont les plus compliquées et celles qui exigent le plus de précision dans l'ajustement. Elles sont beaucoup plus coûteuses que toutes les autres machines, mais en revanche elles offrent une régularité de marche qui se prête aux opérations industrielles les plus délicates.

Le principal inconvénient de ces machines est d'exiger une hauteur assez grande, et de présenter, en général, une stabilité moindre que celle des machines horizontales.

408. **Machine horizontale.** — La machine horizontale n'est, pour ainsi dire, que la machine précédente, supposée couchée. Ce type de machines, aujourd'hui très-fréquemment employé, a été amené à une grande perfection par M. Farcot.

Comme exemple de machines horizontales, nous citerons les *locomobiles*, qui sont simplement des machines à vapeur ordinaires, offrant

Fig. 277. — Locomobile (machine horizontale).

l'avantage de pouvoir être transportées sur le lieu même où elles doivent effectuer un travail de quelques heures.

Deux paires de roues portent à la fois la chaudière, avec son foyer et sa cheminée, et la machine avec son volant (*fig.* 277).

La chaudière est une chaudière tubulaire, comme celle des locomotives (396), avec cette différence que les tubes sont plus gros, plus courts, et moins nombreux : le foyer A est placé à l'arrière, la cheminée D à l'avant, en sorte que l'ensemble offre une ressemblance grossière avec une locomotive.

La machine, dont on voit le cylindre en H, est une machine horizontale, qui fonctionne sans condenseur, afin de pouvoir être employée dans un lieu quelconque. Ce sont donc des machines à *haute pression* (401), dont la puissance est assez faible : on est d'ailleurs toujours restreint, quant aux dimensions à leur donner, par la nécessité de ne les rendre ni trop lourdes ni trop encombrantes (*).

409. **Machines oscillantes.** — On a cherché enfin à simplifier encore la transmission du mouvement, en supprimant même la bielle, et faisant agir directement la tige des pistons sur la manivelle de l'arbre ; alors, l'extrémité de cette tige devant suivre le bouton de la manivelle dans son mouvement de rotation, il devient nécessaire de rendre le cylindre mobile, dans le plan du cercle décrit par la manivelle elle-même ; en d'autres termes le cylindre doit être *oscillant*.

La figure 278 représente l'une de ces machines, dont l'invention est due à M. Cavé. Le piston est monté sur deux tourillons qui constituent un axe de rotation passant par son milieu, et, ces tourillons étant alors la seule partie du cylindre qui ne se déplace pas, c'est par des cavités pratiquées dans leur intérieur qu'ont lieu l'arrivée et la sortie de la vapeur : la figure 278 montre en D la boîte à vapeur qui environne l'un d'eux. La tige du piston ; articulée avec la manivelle C, est assujettie à sa partie supérieure entre des glissières fixées au cylindre lui-même.

Fig. 278. — Machine oscillante.

Ces machines ont l'avantage d'occuper très-peu de place et d'être très-légères : elles sont employées surtout pour les bateaux à vapeur.

410. **Bateaux à vapeur et locomotives.** — Les divers systèmes dont nous venons de donner une idée succincte ont fourni, outre les machines fixes employées par l'industrie, des machines servant à la navigation et aux transports sur les chemins de fer.

Dans les *bateaux à vapeur*, l'organe dont l'action sur l'eau doit produire le mouvement du navire, est, tantôt un couple de *roues à aubes*

(*) Les locomobiles de la force de 4 à 5 chevaux ont un poids qui atteint déjà 2000 kilogrammes.

placées sur les flancs du navire, et dont les palettes fonctionnent, en définitive, comme des espèces de rames; tantôt une *hélice* plongée dans l'eau, à l'arrière du navire, et dont le mouvement dans le liquide est comparable à celui d'une vis dans son écrou. — Le mouvement de rotation de l'un ou de l'autre de ces propulseurs est produit par une ou plusieurs machines, installées à bord, et absolument semblables aux machines fixes. On fait usage presque exclusivement aujourd'hui, pour la navigation, de machines à action directe (406), et on emploie particulièrement des machines oscillantes (409), lorsqu'on veut à la fois ménager l'espace et ne pas trop charger le navire.

Dans les *locomotives*, l'action de la vapeur est employée à faire tourner une ou plusieurs paires de roues, qui contribuent à porter le châssis sur lequel est installée la machine. C'est le frottement de ces roues sur les rails de fer qui détermine le mouvement de tout le système; on leur donne le nom de *roues motrices* pour les distinguer des autres, qui sont les *roues porteuses*.

Dans le système représenté par la figure 279, l'action motrice s'exerce sur une seule des trois paires de roues, la paire du milieu E. Le mouvement est produit par un système de deux machines placées, l'une à droite, l'autre à gauche de la chaudière : les actions de ces deux machines concordent pour faire tourner l'essieu auquel sont invariablement fixées les deux roues. Ce sont des machines à action directe, fonctionnant à haute pression et sans condenseur : la figure 279 montre, en A, le cylindre de l'une d'elles; en B, la tige du piston, guidée entre des glissières; en C, la bielle qui vient ici s'articuler directement sur l'une des roues motrices. — La chaudière est, comme il a été dit (396), une chaudière tubulaire; nous avons indiqué également comment le dégagement de la vapeur dans la cheminée active le tirage au travers de tout le système traversé par la fumée.

411. **Machines à gaz — Machine de M. Lenoir et machine de M. Hugon.** — On désigne sous le nom de *machines à gaz* des machines dont l'emploi commence à devenir industriel, et où le mouvement du piston est produit par la combustion d'un mélange gazeux, combustion s'effectuant dans le cylindre lui-même. — Le seul mélange gazeux qui ait été vraiment utilisé jusqu'ici est le mélange de gaz d'éclairage et d'air : c'est le seul qui soit économique. On fait d'ailleurs en sorte que l'air soit toujours en excès, le gaz d'éclairage n'entrant dans le mélange que pour 7 centièmes environ : on obtient alors, non pas une violente explosion se produisant à la fois dans toute la masse, mais une combustion qui s'effectue, pour ainsi dire, par couches successives, et une pression qui n'est guère que de 5 à 6 atmosphères

Dans ces machines, le piston lui-même aspire derrière lui dans le cylindre, une fois la machine lancée, le gaz combustible et l'air extérieur; quand le piston arrive en un point déterminé de sa course, le tiroir, qui

avait d'abord permis l'admission du mélange gazeux, ferme complétement la lumière : c'est alors qu'on produit l'inflammation du mélange, dont la

Fig. 279. — Locomotive.

combustion donne lieu à une élévation de température considérable et à une pression de 5 à 6 atmosphères s'exerçant sur le piston. — Ces ma-

chines sont à double effet, et présentent la plupart des pièces accessoires des machines à vapeur.

Il nous reste à indiquer comment on obtient l'inflammation du mélange gazeux, au moment précis où elle doit avoir lieu. — Dans la *machine Lenoir*, une étincelle électrique, produite par une petite bobine de Ruhmkorff (livre III), montée avec deux ou trois éléments de Bunsen (*ibid.*), jaillit dans l'intérieur du cylindre. — Dans la *machine Hugon*, l'intervention de l'électricité est supprimée : l'inflammation se produit par des becs de gaz, installés dans deux petites cavités ménagées dans le tiroir. Chacun de ces becs, en pénétrant dans l'intérieur de la boîte, allume le mélange et s'éteint lui-même par l'explosion ; il sort alors de la boîte, et vient se rallumer à un bec fixe placé à l'extérieur ; il rentre ensuite dans la boîte, au moment où il doit allumer de nouveau le mélange, et ainsi de suite.

Dans les machines à gaz, en général, la combustion se produisant dans le cylindre lui-même donne lieu à un dégagement de chaleur considérable : aussi est-il nécessaire, pour éviter une élévation de température trop grande, qui rendrait le graissage défectueux et détruirait les joints, de faire circuler constamment un courant d'eau froide autour du cylindre, dans une double enveloppe.

Jusqu'ici, les machines à gaz sont inférieures aux machines à vapeur, comme économie, lorsqu'il s'agit d'un travail régulier, devant se continuer longtemps et à poste fixe. Elles sont précieuses surtout pour les travaux intermittents, puisqu'il suffit de quelques minutes pour les mettre en mouvement ou pour les arrêter, sans qu'on ait à supporter de dépense de combustible dans les intervalles de repos de la machine : pour ce genre d'usage, en particulier, on conçoit que, tout compte fait, elles puissent offrir un avantage considérable, au point de vue économique, sur celles où le foyer doit être allumé longtemps avant que la machine elle-même puisse être mise en action d'une manière efficace.

La Propagation de la chaleur (chaleur rayonnante et conductibilité) est reportée à la fin de l'Optique (livre V).

LIVRE TROISIÈME

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

CHAPITRE PREMIER

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

---

412. **Électricité.** — L'ambre jaune ou succin (ἤλεκτρον), lorsqu'on le frotte avec une étoffe de laine ou de soie bien sèche, acquiert la propriété d'attirer les corps légers, tels que la sciure de bois, les barbes de plume, ou de petits fragments de papier ; cette propriété, connue déjà des philosophes de l'antiquité, fut attribuée par eux à une cause spéciale qui prit le nom d'*électricité*.

A la fin du seizième siècle, on reconnut la même propriété dans un grand nombre d'autres corps, comme la résine, le verre, le soufre, la soie, le taffetas ; toutes ces substances *s'électrisent* quand on les frotte, c'est-à-dire qu'elles deviennent capables, comme le succin, d'attirer les corps légers. — Ces expériences, faites d'abord par Gilbert, médecin de la reine Élisabeth d'Angleterre, et répétées bientôt par tous les savants, semblèrent exclurent de la liste des substances électrisables certains corps, et en particulier tous les métaux : en effet, une tige métallique, tenue à la main et frottée, ne donne aucun signe d'électricité. De là, une classification qui partageait les corps de la nature en deux groupes, les uns regar-

dès comme électrisables ou *idio-électriques*, les autres comme non électrisables ou *anélectriques*.

413. **Corps conducteurs et corps mauvais conducteurs.** — Cependant, un peu plus tard, vers le commencement du dix-huitième siècle, le physicien anglais Gray, en prenant à la main un tube de verre, et frottant l'extrémité pour l'électriser, vit avec étonnement qu'une tige métallique, plantée dans un bouchon qui fermait cette extrémité, partageait avec le tube lui-même la propriété d'attirer les corps légers. Il suspendit à la tige une chaîne métallique, qui descendait du haut d'une terrasse jusque près du sol, et il put constater que les derniers anneaux de la chaîne attiraient encore les brins de paille qu'on leur présentait. — Ces expériences et quelques autres conduisirent à considérer l'électricité comme due à un fluide particulier, impondérable et inaccessible à nos sens, que le frottement développe sur les corps tels que l'ambre ou le verre. On admit que, dans l'expérience de Gray, le fluide, développé sur les parties du tube qui touchaient le bouchon, s'était répandu sur le liége, sur la tige et sur la chaîne métallique.

On donna dès lors le nom de *corps conducteurs* à ceux qui paraissent n'opposer aucun obstacle à l'expansion du fluide électrique, et qui en manifestent immédiatement la présence dans toutes leurs parties. — Tous les métaux sont conducteurs ; il en est de même du corps humain et du sol lui-même. On conçoit donc que, si l'on touche avec la main un métal électrisé, le fluide électrique doit se répandre dans le corps humain et dans le sol, où sa présence devient insensible. De là le nom de *réservoir commun*, qui fut employé pour désigner le globe terrestre, dans lequel se rend le fluide électrique primitivement développé dans les corps conducteurs qu'on met en communication avec lui.

Au contraire, si l'on tient à la main l'une des extrémités d'un bâton de verre, et qu'on frotte l'autre extrémité, les points frottés acquièrent seuls la propriété d'attirer les corps légers ; il en est de même de l'ambre, de la résine, etc. — On nomme en général *corps mauvais conducteurs* ceux dans lesquels le fluide électrique paraît se mouvoir avec une extrême difficulté, et semble presque exclusivement maintenu aux points où il a été développé.

Fig. 280.

414. **Électrisation directe des métaux par le frottement. — Corps isolants.** — Il est maintenant facile de constater que tous les corps, même les métaux, peuvent être directement électrisés par le frottement. — Fixons un cylindre métallique A (*fig.* 280) à l'extrémité d'un manche de verre M, que nous tiendrons à la main pendant que nous frotterons le métal : nous constaterons que ce dernier devient capable d'attirer les corps légers, le verre étant interposé comme une sorte de barrière entre le cylindre et la main, pour empêcher le fluide électrique de s'écouler dans le sol. On dit alors que le verre a joué, par

rapport au métal, le rôle d'un *corps isolant*. Un corps mauvais conducteur quelconque peut évidemment être employé de la même manière.

Donc, *tous les corps sont électrisables par le frottement* ; mais ceux qui avaient d'abord été considérés comme anélectriques sont *bons conducteurs* du fluide électrique : ils ne peuvent donner de signes d'électrisation que s'ils sont *isolés* du sol par un *mauvais conducteur*.

415. **Conductibilité des divers corps pour l'électricité.** — Les différents corps manifestent, à des degrés divers, la propriété de transmettre ou de conserver le fluide électrique ; ils sont, à des degrés divers, bons ou mauvais conducteurs.

Ainsi, les métaux, le coke, l'eau, le corps humain, le sol et en général les corps imprégnés de liquides aqueux sont bons conducteurs. — Le verre lui-même peut devenir conducteur lorsqu'il se couvre d'humidité, ce qui arrive fréquemment à cause de ses propriétés hygrométriques. Pour éviter ce dépôt, on y applique souvent un vernis à la gomme-laque : c'est ce qu'on fait, par exemple, pour les pieds de verre qui isolent les pièces métalliques des appareils destinés à l'étude de l'électricité. Il est d'ailleurs toujours indispensable, pour peu que l'air soit humide, de sécher ces appareils, en les chauffant et les essuyant doucement avec une étoffe de laine.

Parmi les mauvais conducteurs, on doit placer l'ambre, le verre, la résine, la gomme-laque, le caoutchouc, la soie, l'essence de térébenthine et les huiles, les gaz secs et l'air lui-même. — Il est clair que si l'air n'était pas un corps isolant, l'électricité ne pourrait être maintenue à la surface des corps et les phénomènes électriques nous seraient inconnus. Mais l'air devient d'autant plus conducteur qu'il est plus humide, en sorte que la déperdition d'électricité par l'air est d'autant plus grande que l'état hygrométrique est plus élevé.

416. **Distinction des deux espèces d'électricités.** — L'électricité développée à la surface des différents corps par le frottement est-elle toujours de même nature? — Cette question peut être résolue au moyen d'une expérience faite par Dufay, peu de temps après les précédentes.

Prenons un *pendule électrique*, c'est-à-dire une petite balle de sureau A (*fig.* 281), suspendue à un fil de soie E fixé lui-même à un support de verre C ; la soie et le verre étant mauvais conducteurs, le sureau gardera l'électricité qui pourra lui être communiquée. Approchons-en d'abord un bâton de résine D, frotté avec du drap ; le pendule est attiré et vient toucher la résine (*fig.* 282) ; puis il est repoussé (*fig.* 283) et s'éloigne chaque fois qu'on en approche la résine électrisée. Or le sureau est un corps conducteur ; en venant toucher la résine, il s'est donc chargé de la même électricité : donc deux corps chargés de l'électricité de la résine se repoussent. — Pendant que le sureau est ainsi électrisé, frottons un bâton de verre avec un morceau de drap, et approchons-le du pendule ; celui-ci est vivement attiré. L'électricité du verre n'est donc pas identique à celle

de la résine : appelons ces deux électricités *électricité résineuse* et *électricité vitrée*. — La même expérience peut maintenant être reprise en opérant avec les mêmes corps dans l'ordre inverse, pourvu qu'on ait soin de

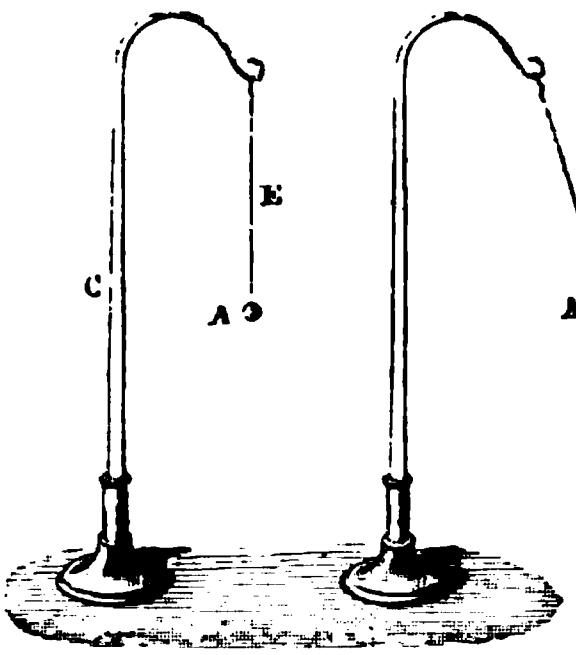


Fig. 281.

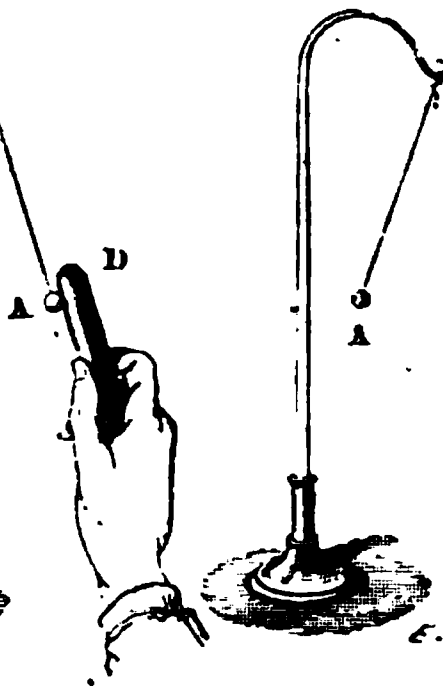


Fig. 282.

Fig. 283.

toucher préalablement la balle de sureau avec la main, de manière à conduire dans le sol l'électricité qu'elle pourrait avoir gardée : en approchant alors le bâton de verre électrisé, on observera une attraction, un contact, puis une répulsion ; la balle ainsi électrisée sera, au contraire, attirée par la résine. — De ces expériences, on peut donc conclure les propositions suivantes :

Deux corps chargés de la même électricité se repoussent.

Deux corps chargés, l'un d'électricité résineuse, l'autre d'électricité vitrée, s'attirent.

Dès lors, pour savoir quelle est la nature de l'électricité dont est chargé un corps quelconque, on pourra prendre un pendule électrique chargé, par exemple, d'électricité résineuse ; et, selon que le corps exercera sur ce pendule une répulsion ou une attraction, on conclura que son électricité est analogue à celle de la résine ou à celle du verre. On est ainsi conduit à distinguer deux espèces d'électricités, et deux seulement.

Cependant les dénominations d'électricité vitrée et d'électricité résineuse, qui semblent faire dépendre la nature de l'électricité de la nature du corps frotté, ont dû disparaître devant cette remarque qu'un même corps peut prendre l'une ou l'autre, selon les circonstances. Le verre lui-même est dans ce cas : ainsi, le verre poli prend l'électricité résineuse s'il est frotté avec la peau de chat, l'électricité vitrée s'il est frotté avec une étoffe de laine ; le verre dépoli, frotté avec une étoffe de laine, prend l'électricité résineuse (*). Aussi remplacerons-nous l'expression d'électricité

(*) On a pu dresser des tableaux dans lesquels les corps sont placés dans un ordre tel, que chacun d'eux prend l'électricité vitrée (ou positive) s'il est frotté par l'un des

vitrée par l'expression d'*électricité positive*, et celle d'électricité résineuse par celle d'*électricité négative ;* les signes + et — pourront servir à indiquer, sur nos figures, la présence de l'une ou de l'autre aux différents points d'un appareil. — Ces dénominations, empruntées à une théorie de Franklin, dont nous dirons quelques mots plus loin, n'auront pour nous qu'une signification purement conventionnelle.

417. **Deux corps frottés l'un contre l'autre prennent des électricités contraires.** — En développant l'électricité par le frottement, en frottant, par exemple, un bâton de verre avec un morceau de drap, nous avons recherché l'électricité seulement sur le verre; l'électricité qui aurait pu se développer sur le drap aurait été conduite dans le sol. — Si au lieu d'opérer ainsi, on isole, au moyen de manches de verres, deux plateaux C et B (*fig.* 284), l'un en verre poli, l'autre en bois recouvert d'une étoffe de laine, qu'on les frotte l'un contre l'autre, et qu'on les présente à un pendule électrique chargé d'électricité positive, le pendule est repoussé par le plateau de verre, et attiré par la laine. — On obtient le même résultat, quels que soient les corps employés, pourvu qu'ils soient bien isolés (*).

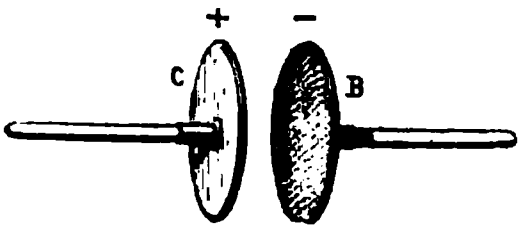


Fig. 284.

418. **Théorie de Franklin : hypothèse d'un seul fluide électrique.** — Le rapprochement des résultats fournis par l'expérience a donné naissance à deux théories, qui ont l'une et l'autre pour point de départ une hypothèse permettant de relier entre eux les phénomènes.

Dans l'hypothèse émise par Franklin, tous les corps possèdent un seul et même fluide électrique ; les molécules de ce fluide exercent les unes sur les autres une action répulsive, mais elles ont pour les molécules matérielles une adhérence qui est plus ou moins grande selon la nature du corps. Chaque corps, lorsqu'il est à l'*état naturel*, contient une quantité

corps qui le suivent, et l'électricité résineuse (ou négative) s'il est frotté par l'un des corps qui le précèdent. Voici l'un de ces tableaux :

1. Peau de chat.	4. Plumes.	7. Soie.
2. Verre poli.	5. Bois.	8. Gomme-laque.
3. Drap de laine.	6. Papier.	9. Verre dépoli.

On voit par ce tableau que deux morceaux du même verre, l'un poli, l'autre dépoli, frottés l'un contre l'autre, prennent, le premier l'électricité vitrée, le second l'électricité résineuse.

(*) Dans le cas même où les deux corps frottés l'un contre l'autre sont de même nature, si l'électricité positive se manifeste sur l'un d'eux, l'électricité négative apparaît toujours sur l'autre ; le sens du phénomène dépend alors de circonstances particulières, dont l'influence est encore assez mal définie.

Ces expériences ont été variées de bien des manières ; en voici seulement quelques exemples : Si deux échantillons d'un même corps sont frottés l'un contre l'autre, c'est ordinairement le plus chaud ou le plus rugueux qui se charge d'électricité négative. Si deux rubans de soie placés en croix glissent l'un sur l'autre, c'est le ruban frotté transversalement qui se charge d'électricité négative.

déterminée de fluide ; si cette condition est réalisée pour un certain nombre de corps en présence, il y a équilibre dans chacun d'eux et dans l'ensemble. — Si deux corps, A et B, viennent à être frottés l'un contre l'autre, il y a passage d'une certaine quantité de fluide de l'un à l'autre : l'un d'eux, A par exemple, ayant acquis un excès de fluide, est à l'*état positif;* l'autre B, qui en contient moins qu'auparavant, est à l'*état négatif*. Les nouveaux états de ces deux corps diffèrent donc des états initiaux, et ils en diffèrent en sens contraire. Il est d'ailleurs facile de concevoir que le même corps A, primitivement à l'état naturel, s'il était frotté avec un autre corps B′, pourrait devenir négatif, le corps B′ devenant alors positif. — Le sens dans lequel se produit le phénomène doit dépendre d'un rapport entre les constitutions relatives des deux corps, rapport dont on conçoit vaguement l'influence, sans pouvoir rien formuler de précis à cet égard.

Cette théorie rend compte de l'attraction qui se manifeste entre les corps électrisés et les corps à l'état naturel. En effet, si le corps A, à l'état positif, est mis en présence d'un corps à l'état naturel C, une partie de son fluide tend à passer sur C, et peut déterminer un rapprochement entre les deux corps, à cause de l'adhérence des fluides pour les molécules matérielles. De même, si l'on approche le corps négatif B du corps à l'état naturel C, le fluide fait effort pour passer de C sur B, et peut encore déterminer un rapprochement. A plus forte raison explique-t-on de la même manière l'attraction entre deux corps contenant des électricités différentes, etc.

419. **Théorie de Symmer : hypothèse des deux fluides.** — Dans l'hypothèse due au physicien anglais Symmer, on admet dans tous les corps l'existence simultanée de deux fluides différents, qu'on appelle *fluide vitré* ou positif, et *fluide résineux* ou négatif. — Les molécules de chacun d'eux, comme celles du fluide unique de Franklin, se repoussent entre elles, mais les molécules de fluide vitré attirent les molécules de fluide résineux, et réciproquement.

Lorsqu'un corps ne manifeste pas de trace d'électrisation, on admet que les deux fluides sont distribués dans ce corps en *quantités égales;* en d'autres termes, on admet que chaque point du corps contient des quantités de fluide vitré et de fluide résineux telles, que les actions contraires de l'un et de l'autre sur une molécule d'un fluide extérieur quelconque se neutralisent, et que tout se passe comme si ces fluides n'existaient pas. — On dit alors que le corps est à l'*état neutre*.

Dans cette théorie, le frottement de deux corps A et B l'un contre l'autre accumule graduellement le fluide vitré sur l'un A, et le fluide résineux sur l'autre B, en sorte que, au moment où l'on sépare ces deux corps, chacun d'eux manifeste la prédominance de l'un ou de l'autre fluide.

On conçoit alors que deux corps, frottés l'un contre l'autre et séparés ensuite, doivent exercer l'un sur l'autre une attraction, et que leur réu-

nion doit les ramener tous deux à l'état neutre. — Quant à l'attraction des corps non électrisés par les corps électrisés, elle sera expliquée plus loin.

C'est cette théorie qu'admettent la plupart des physiciens français, à cause de la facilité avec laquelle elle permet d'expliquer les résultats de l'expérience, ou d'en prévoir de nouveaux.

II. — LOIS DES ACTIONS ÉLECTRIQUES.

420. Mesure des attractions et répulsions électriques; balance de Coulomb. — Les lois des attractions et des répulsions électriques ont été découvertes au moyen de la *balance de Coulomb;* cet instrument fournit, maintenant encore, la méthode de vérification la plus simple de ces lois.

La balance de Coulomb est représentée par la figure 285; BC est une aiguille de gomme-laque, portant en B une balle de sureau dorée; en C. est un contre-poids formé par une petite masse de gomme-laque. Cette aiguille est soutenue, au centre de la cage de verre RR', par un fil métallique fin, placé dans l'axe de la colonne creuse de verre, et maintenu dans une pince P à la partie supérieure. On peut soulever cette pince indépendamment de toute la garniture métallique qui surmonte le tube de verre; elle est représentée avec la garniture, à une échelle plus grande, sur la droite de la figure. La garniture elle-même se compose de deux tambours : l'inférieur SS' est mastiqué sur le tube de verre, et sa circonférence est divisée en degrés; le supérieur MM' tourne à frottement sur le précédent, et porte un trait de repère, servant à mesurer les rotations qu'on lui imprime. La cage de verre porte, sur ses faces verticales et dans le même plan horizontal que l'aiguille, une bande de papier portant des divisions qui correspondent aux degrés du cercle décrit par l'aiguille : le zéro est placé, dans la figure ci-dessus, au milieu E de la face verticale de gauche Enfin, dans la face supérieure de la cage, est pratiquée une ouverture par laquelle on peut introduire une petite sphère métallique A,

Fig. 285. — Balance de Coulomb.

supportée par une tige de verre, de façon que le centre de cette sphère corresponde à la position occupée par le centre de la boule B quand l'aiguille est au zéro.

Avant de faire une expérience, on dessèche l'air de la cage, en y laissant longtemps séjourner des fragments de chaux vive. Puis, le trait de repère de MM′ ayant été mis au zéro de la graduation de SS′, on soulève la pince P, s'il est nécessaire, pour la tourner de façon que l'aiguille se place d'elle-même au zéro E; cela fait, on devra laisser la pince fixée au tambour MM′, et n'y plus toucher pendant toute la suite de l'expérience. — L'instrument est alors *réglé*.

421. Il suffit, pour comprendre l'emploi de l'instrument, d'admettre le principe suivant, qui a été démontré à la fois par la théorie et par l'expérience : l'extrémité supérieure P du fil étant fixe, si l'on tord le fil en faisant décrire à l'aiguille BC un certain angle, et si l'on veut maintenir l'aiguille dans cette nouvelle position au moyen d'une force appliquée à son extrémité B, cette *force de torsion* doit être *proportionnelle à l'angle de torsion*. — En d'autres termes, si l'on convient de prendre pour unité la force que l'on doit appliquer en B pour conserver au fil une torsion de 1 degré, la force nécessaire pour conserver au fil une torsion de n degrés sera représentée par le nombre n lui-même.

422. **Loi des distances.** — Pour étudier la loi suivant laquelle varient les forces répulsives de deux corps chargés d'une même électricité, quand on fait varier la distance qui les sépare, on enlève la boule fixe A (*fig.* 285) pour l'électriser, et on la replace ensuite dans la cage de verre; la boule mobile B vient d'abord la toucher, puis elle est repoussée par elle, et s'arrête, après quelques oscillations, à une certaine distance de A, en B′C′ (*fig.* 286); supposons que l'angle de déviation de l'aiguille, mesuré au moyen des divisions tracées sur la cage, soit, comme dans l'expérience citée par Coulomb, de 36°. Dans ce moment, la distance des deux boules est sensiblement égale à la longueur de l'arc BB′ décrit par la boule mobile; représentons-la donc par 36 : quant à la force répulsive qui s'exerce entre les boules, elle fait équilibre à une force de torsion qui a la même mesure que l'angle de torsion lui-même (421); elle peut donc être représentée aussi par 36. — Tournons maintenant le tambour MM′ en sens contraire de la déviation de l'aiguille, c'est-à-dire dans le sens de la flèche *f* (*fig.* 287), et amenons ainsi l'angle d'écart à être moitié moindre, c'est-à-dire de 18°; si l'on mesure l'angle dont il a fallu tourner MM′, au moyen de la graduation tracée sur SS′, on trouve qu'il est de 126°. Or la distance des deux boules, sensiblement

Fig. 286.

égale à l'arc BB″, peut se représenter par 18; quant à la force répulsive, elle est mesurée par un angle de torsion qu'on obtient en faisant la somme 126° + 18°, puisqu'on peut considérer le fil comme ayant été amené à sa position actuelle par une torsion de son extrémité supérieure égale à 126°, et par une torsion de son extrémité inférieure, en sens contraire, égale à 18°: la force répulsive des deux boules a donc pour mesure 126 + 18, ou 144. — De même, pour amener la déviation de l'aiguille à n'être plus que de 9°, l'expérience montre qu'on doit tourner MM′ d'un angle total de 567°; c'est-à-dire que, à une distance représentée par 9, la force répulsive est représentée par 567 + 9 ou 576, et ainsi de suite. — Prenons maintenant les rapports des distances 36, 18, 9, c'est-à-dire divisons chacune d'elles par la première : nous aurons pour quotients les nombres $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$; en faisant le même calcul pour les forces de torsion, nous aurons pour quotients $\frac{36}{36} = 1, \frac{144}{36} = 4, \frac{576}{36} = 16$; en d'autres termes, les distances variant comme $1 . \frac{1}{2} \frac{1}{4}$, les forces répulsives ont varié comme 1, 4, 16; d'où l'on déduit cette loi :

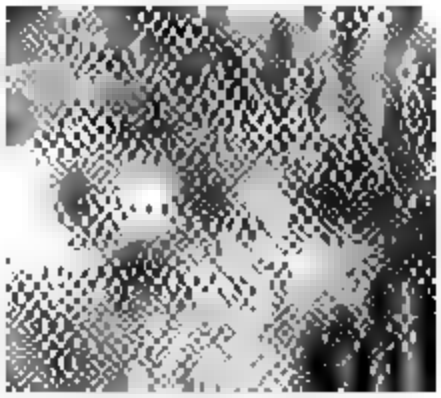


Fig. 287.

Les forces répulsives de deux corps chargés de la même électricité sont en raison inverse des carrés de leurs distances.

Les forces attractives de deux corps chargés d'électricités contraires suivent la même loi.

425. **Loi des quantités d'électricité.** — On pourrait regarder comme évident *a priori* que les actions électriques sont proportionnelles aux quantités d'électricité; cela revient, en effet, à supposer que si, à une certaine quantité d'électricité agissant entre deux corps, on en ajoute une nouvelle; l'action totale, qui s'exerce toujours dans la même direction et à la même distance, est égale à la somme des actions partielles : c'est ce qu'on admet dans tous les phénomènes naturels.

Il est bon cependant de vérifier cette loi par l'expérience, et c'est ce qu'a fait Coulomb, en employant encore la balance de torsion. — On charge les boules A et B de la même électricité, en électrisant A et laissant B arriver au contact; soit Q et Q′ les quantités d'électricité dont elles restent respectivement chargées. On observe la force de torsion qui se développe par leur répulsion mutuelle, à une distance de 20 degrés par exemple. — On touche alors la boule fixe A avec une autre boule exactement égale : celle-ci lui enlève la moitié de son électricité, en sorte

que la boule A conserve seulement la charge $\frac{Q}{2}$; on ramène les boules à la même distance 20 degrés, en tournant le tambour supérieur, et on mesure la force de torsion, qu'on trouve égale à la moitié de la précédente. — Il est évident, d'après cela, que si l'on touchait maintenant la boule B avec une autre boule égale, de manière qu'elle conservât seulement la charge $\frac{Q'}{2}$, la force répulsive exercée à la même distance deviendrait la moitié de la précédente, ou le quart de la force répulsive initiale : or le produit des quantités d'électricité des deux boules est alors $\frac{Q}{2} \times \frac{Q'}{2}$ ou $\frac{Q \times Q'}{4}$; la force répulsive diminuerait donc, dans ce cas, proportionnellement au produit des deux charges.— Il est clair qu'il en serait de même, quel que fût le nombre des contacts. En général :

Les forces attractives ou répulsives qui s'exercent entre deux corps électrisés, à une distance constante, sont proportionnelles aux produits des deux quantités d'électricité (*).

* **424. Notions générales sur la déperdition de l'électricité.** — Pour que les expériences sur la mesure des forces électriques donnent des résultats exacts, il faut tenir compte de la déperdition d'électricité qu'éprouvent toujours les corps mis en présence. Cette déperdition peut tenir à diverses causes. — On sait, en effet, que le verre, la gommelaque, la résine, dont on se sert comme isolants, ne sont pas absolument dépourvus de conductibilité. D'autre part, les couches d'air qui environnent un corps électrisé s'électrisent elles-mêmes, puis sont repoussées, et cèdent leur place à d'autres couches qui emportent à leur tour une nouvelle quantité d'électricité. Enfin, l'air possède toujours un certain degré de conductibilité, variable avec son état hygrométrique.

Toutes ces causes de déperdition ont été, de la part de Coulomb, l'objet d'une étude complète. La méthode consistait à charger de la même électricité les deux sphères A et B de sa balance, à les maintenir toujours à la même distance en diminuant la torsion du fil, et à mesurer les forces répulsives à divers instants, au moyen de la torsion elle-même. — Voici les principaux résultats de ces recherches.

(*) L'étude des lois précédentes a été reprise par divers expérimentateurs, notamment par M. Harris en Angleterre, et par M. Marié-Davy en France. Il résulte de ces nouvelles recherches : 1° que la loi relative aux quantités d'électricité est rigoureusement exacte ; 2° que la loi de la raison inverse du carré des distances peut également être considérée comme exacte, dès que la distance des centres surpasse neuf ou dix fois le rayon de chaque sphère. — Si donc deux sphères de dimensions *infiniment petites*, ou deux *éléments* matériels, chargés d'électricité, sont placés à une distance *finie* l'un de l'autre, leurs attractions ou leurs répulsions mutuelles suivent les deux lois énoncées : c'est ce qu'on a coutume d'exprimer en disant que ces lois définissent les actions des *éléments électriques* les uns sur les autres.

La *perte par les supports* est négligeable, lorsque la charge est assez faible et le support suffisamment long (*).

Les *pertes dues au contact de l'air seul* varient, pendant des intervalles de temps égaux entre eux et très-courts, proportionnellement aux charges électriques moyennes pendant ces intervalles. — Cette loi, tout à fait semblable à celle qui sera énoncée plus loin pour les pertes de chaleur d'un corps qui se refroidit par rayonnement, ne représente rigoureusement les phénomènes que dans les cas où la charge électrique est peu considérable ; elle montre d'ailleurs que la perte absolue en une seconde va sans cesse en décroissant, puisque la charge électrique diminue elle-même à mesure que l'expérience se prolonge.

III. — DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ SUR LES CORPS CONDUCTEURS.

* **425.** Dans les corps mauvais conducteurs, les fluides électriques restent comme fixés aux points où on les a développés; il n'y a donc pas lieu d'étudier la distribution de l'électricité sur ces corps.

Les corps bons conducteurs, au contraire, opposent une résistance presque nulle aux mouvements des fluides; en admettant alors que les éléments d'un même fluide se repoussent en raison inverse du carré de la distance (**), on peut chercher *a priori* comment l'électricité doit se distribuer, dans les divers cas, pour qu'il y ait équilibre. C'est, en effet, en partant de ce principe que Poisson, Laplace et quelques autres mathématiciens ont pu calculer la distribution de l'électricité dans les cas les plus simples : les résultats fournis par le calcul sont précisément ceux que l'expérience avait déjà donnés ou qu'elle a donnés plus tard, en sorte que chacun d'eux peut être considéré comme une nouvelle confirmation de la loi élémentaire. — Cette remarque générale étant faite, nous nous contenterons d'indiquer les résultats d'expérience les plus importants.

426. **L'électricité ne se manifeste dans les corps conducteurs qu'à la surface.** — Soit une sphère métallique A (*fig.* 288), isolée par un fil de soie ou par un pied de verre, et soit deux hémisphères creux B et C, qui peuvent s'appliquer exactement sur la sphère et qu'on maintient avec des manches isolants. On électrise la boule A, puis on la

(*) En isolant de petites sphères avec des aiguilles de gomme-laque de longueurs croissantes, Coulomb a trouvé que la perte va en diminuant, et qu'elle acquiert une valeur constante pour une longueur déterminée de l'aiguille ou pour toute longueur plus grande : à ce moment, la perte ne peut évidemment être due qu'au contact de l'air. Cette longueur limite de l'aiguille est, d'après Coulomb, proportionnelle au carré de la charge. — De là, la nécessité de charger peu les corps dont on se sert pour l'étude des forces électriques, et de les fixer a des supports isolants assez longs.

(**) Voir la note de la page précédente.

couvre avec les hémisphères; en retirant ceux-ci, on constate qu'ils sont électrisés, tandis que la sphère a perdu toute son électricité.

Soit de même une sphère métallique creuse A (*fig.* 289) portée sur un pied isolant et percée d'une petite ouverture O; si l'on électrise cette sphère et qu'on touche l'un des points de la surface extérieure avec un petit disque de clinquant ou *plan d'épreuve*, isolé au bout d'une longue tige de gomme-laque P, on constate que le disque se charge d'une quantité sensible d'électricité. Si l'on fait la même expérience pour un point intérieur, on ne constate pas trace d'électricité sur le plan d'épreuve.

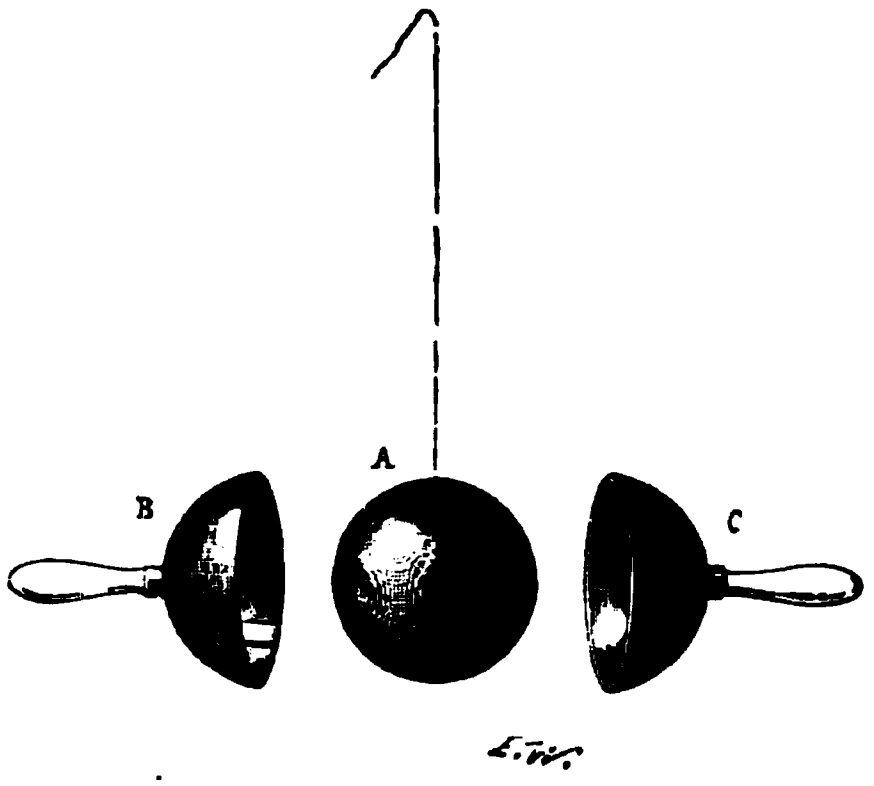


Fig. 288.

Enfin, nous avons déjà vu que, lorsqu'on touche une sphère métallique pleine, électrisée, avec une autre sphère égale, à l'état naturel, la charge se partage également entre les deux sphères. — Or les résultats sont exactement les mêmes si l'on remplace la seconde sphère par une sphère métallique creuse, ou par une sphère de gomme-laque, couverte d'une feuille d'or ou d'argent; donc, c'est la surface seule qui intervient dans le phénomène.

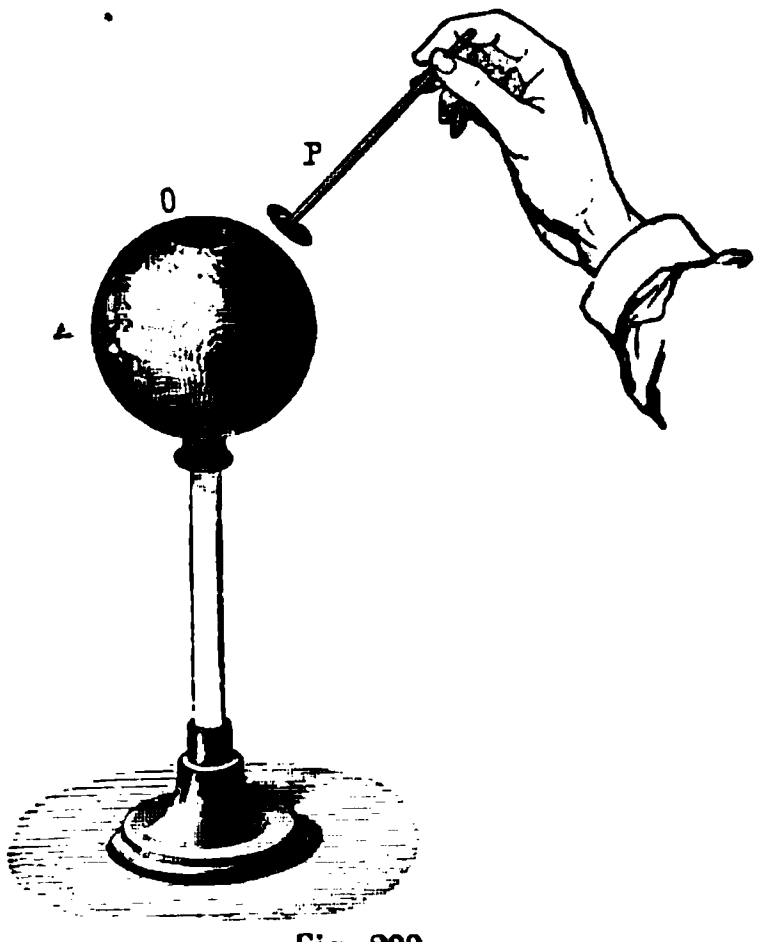


Fig. 289.

D'après ces expériences, dues à Coulomb, l'électricité se porte donc tout entière à la surface des corps. Pour rendre ce résultat sensible, Faraday a imaginé un certain nombre d'expériences ingénieuses; nous citerons seulement l'une des plus frappantes. — Un cercle métallique isolé A (*fig.* 290) soutient un petit sac de mousseline, dont la forme est à peu près celle des filets à papillons : un fil de soie MN traverse le sac et est

attaché à son sommet. Si l'on électrise le cercle métallique, on constate, au moyen du plan d'épreuve, que la surface extérieure du sac est électrisée, la surface intérieure ne donnant pas trace d'électricité ; si alors

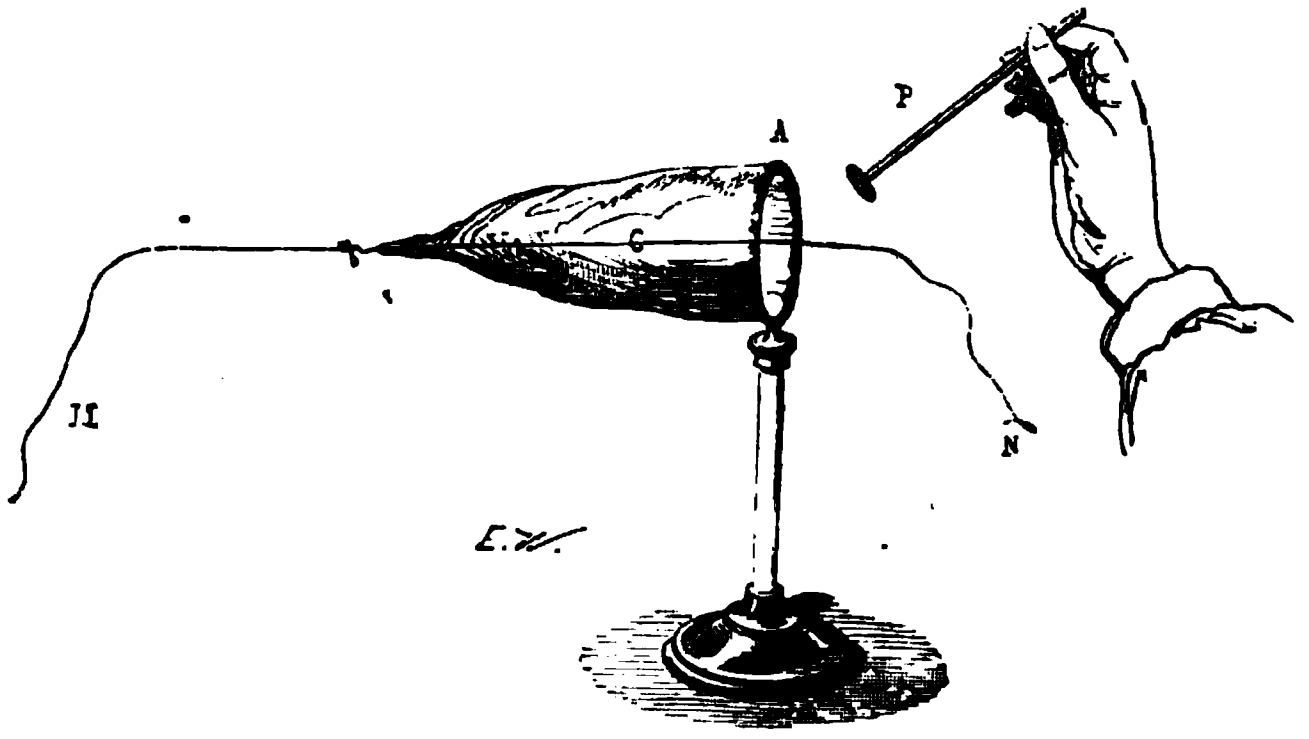


Fig. 290.

on retourne le sac, en tirant sur l'extrémité N du fil, de manière que la surface interne devienne externe et réciproquement, on constate que c'est la nouvelle surface externe qui est seule électrisée.

427. **Étude expérimentale de la distribution de l'électricité sur un corps conducteur de forme quelconque.** — Lorsqu'on touche avec le plan d'épreuve un point quelconque d'un corps conducteur électrisé, le petit disque de clinquant isolé se substitue à l'élément de surface qu'il recouvre, et le calcul montre qu'il prend une quantité d'électricité sensiblement égale à celle de cet élément ; comme d'ailleurs il a une surface très-petite par rapport à celle des corps sur lesquels on opère, ce contact ne modifie pas sensiblement la charge des autres points

De là une méthode simple, pour obtenir les rapports des quantités d'électricité répandues sur les divers points de la surface d'un corps. On touche l'un des points N de la surface d'un corps conducteur (*fig.* 291) avec un plan d'épreuve, et on porte celui-ci dans la balance de Coulomb, à la place de la boule fixe A ; la boule mobile B a été préalablement chargée d'une certaine quantité d'électricité de même nature, quantité qui est supposée demeurer constante pendant toute l'expérience : on établit l'équilibre à une distance angulaire déterminée, de 20°, par exemple. — On fait immédiatement la même détermination en touchant avec le même plan d'épreuve un autre point M de la surface, puis un troisième, et ainsi de suite. Il est clair que, si l'on détermine toutes les forces répulsives à la même distance angulaire de 20 degrés, elles seront proportionnelles aux charges du plan d'épreuve, c'est-à-dire à celles des points touchés.

Cette méthode, telle que nous venons de l'exposer, suppose que les

corps soumis à l'expérience n'éprouvent pas de déperdition sensible. — C'est ce qu'on peut admettre pour la boule mobile, qui est suspendue au milieu d'un air desséché par le chlorure de calcium. Quant au corps

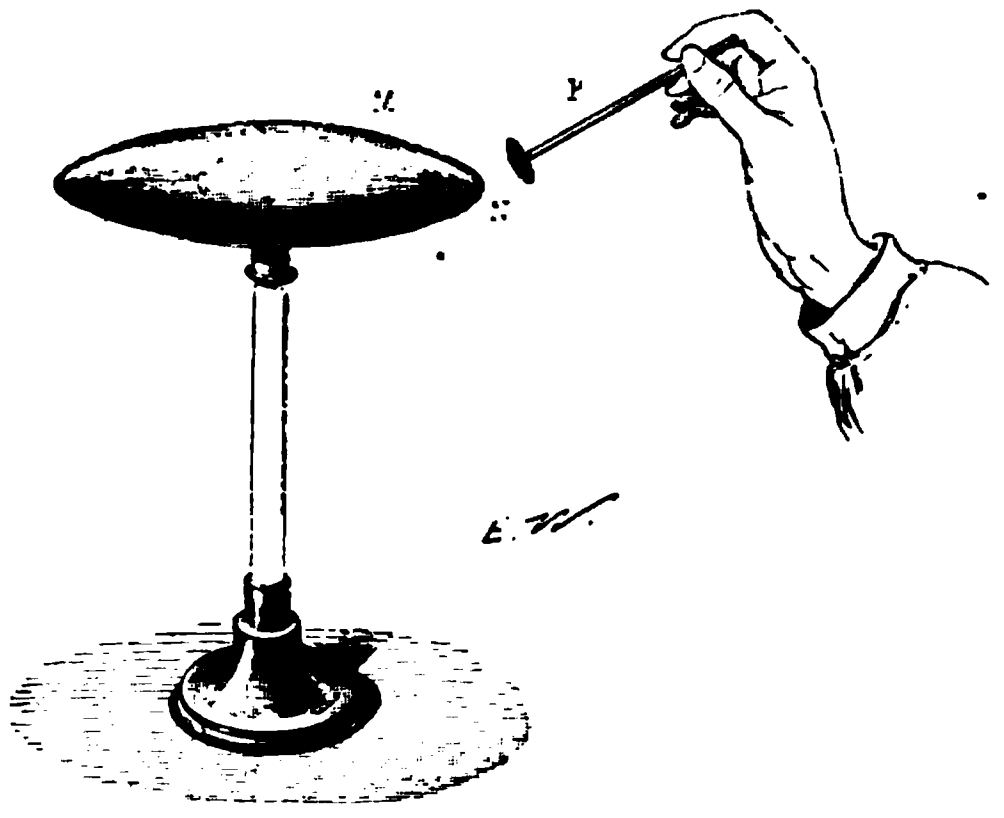


Fig. 291.

conducteur soumis à l'expérience, il est à l'air extérieur : il est donc à craindre que ce corps ne perde, entre les instants où l'on touche ses différents points, des quantités très-sensibles d'électricité. On diminue ces causes d'erreur en opérant rapidement, mais il vaut mieux s'en affranchir en ayant recours à la méthode des *contacts alternatifs*.

* 428. **Méthode des contacts alternatifs**. — Supposons qu'on veuille comparer les charges que possèdent, à un même instant, deux points M et N d'un corps (*fig.* 291). — On touchera d'abord le point M avec le plan d'épreuve, et on en mesurera la charge m en portant le plan d'épreuve dans la balance, comme nous l'avons indiqué ; puis, au bout d'un temps connu après le premier contact, au bout de deux minutes par exemple, on déterminera de même la charge n du point N ; enfin, au bout de deux minutes encore, on mesurera de nouveau la charge m' du point M. On peut admettre sans erreur sensible que, au moment où l'on a déterminé la charge n du point N, celle de M était $\frac{m+m'}{2}$. On opérerait de la même manière pour comparer les charges d'un nombre quelconque de points.

429. **Résultats**. — La méthode précédente, appliquée à des corps conducteurs de formes diverses, a donné les résultats suivants :

Sur une *sphère* isolée, la quantité d'électricité est la même en tous les points de la surface ; ce résultat était évident *a priori*, puisque tous les points de la surface de la sphère sont à la même distance de son centre.

Sur un *ellipsoïde*, les quantités d'électricité accumulées aux extrémités des axes sont proportionnelles aux longueurs de ces axes.

Sur les *disques circulaires*, l'électricité s'accumule vers les bords.

430. **Épaisseur et tension électriques.** — Il résulte de ce qui précède que le fluide électrique semble former à la surface des corps une couche mince, la quantité de fluide contenue sur des éléments de surface égaux pouvant d'ailleurs varier d'un point à l'autre. Laplace et Poisson considèrent cette couche mince comme ayant une épaisseur proportionnelle à la quantité d'électricité, en sorte que, dans chaque cas, la dénomination d'*épaisseur électrique* peut alors être substituée à celle de *quantité d'électricité*.

On voit encore que, si une couche électrique est en équilibre à la surface d'un corps, ses divers éléments exercent les uns sur les autres une répulsion en vertu de laquelle le fluide tend à s'échapper, et se dissiperait en effet s'il n'était maintenu par un mauvais conducteur. Cette action est évidemment d'autant plus intense sur un élément situé à la surface, que l'épaisseur électrique est plus grande au point considéré, et elle peut être regardée comme une mesure de l'énergie avec laquelle l'électricité tend à s'échapper, ou de la *tension électrique*; la comparaison des tensions aux différents points d'un corps peut donc servir encore à caractériser l'état du fluide en ces différents points (*).

Enfin, dans un système invariable de corps conducteurs isolés, les fluides arrivent immédiatement à un état d'équilibre permanent; de là le nom d'électricité *statique*, donné à toute cette partie de l'étude de l'électricité.

431. **Propriétés des pointes et des arêtes vives.** — La distribution de l'électricité sur un ellipsoïde (429) peut faire prévoir que, si le grand axe de l'ellipsoïde s'allonge indéfiniment par rapport aux autres, c'est-à-dire si le corps se termine par une pointe, la charge électrique doit aller en s'accumulant vers cette extrémité, et sa tension doit devenir capable de vaincre la résistance de l'air. — On prévoit donc que les corps conducteurs de cette forme devront avoir la propriété, déjà signalée par Franklin et désignée par lui sous le nom de *pouvoir des pointes*, de laisser échapper incessamment l'électricité. Aussi a-t-on soin d'éviter les pointes et les arêtes vives, dans tous les appareils où l'on veut développer ou conserver l'électricité, et de limiter toujours ces appareils par des surfaces arrondies.

L'écoulement de l'électricité par les pointes peut être manifesté par diverses expériences :

(*) L'*épaisseur* électrique et la *tension*, tout en désignant des quantités qui croissent toujours dans le même sens, ne doivent cependant pas être considérées comme synonymes, ni même comme simplement proportionnelles; on démontre, par un calcul dû à Laplace, que *les tensions aux divers points sont proportionnelles aux carrés des épaisseurs*.

Le fluide qui s'échappe par une pointe se porte sur l'air environnant et le charge de la même électricité; cet écoulement du fluide est manifesté, dans l'obscurité, par une aigrette lumineuse qu'on aperçoit à l'extrémité de la pointe.

De là aussi une répulsion entre l'air et la pointe, en sorte que, si la pointe est fixée sur une machine électrique en activité, en plaçant la main

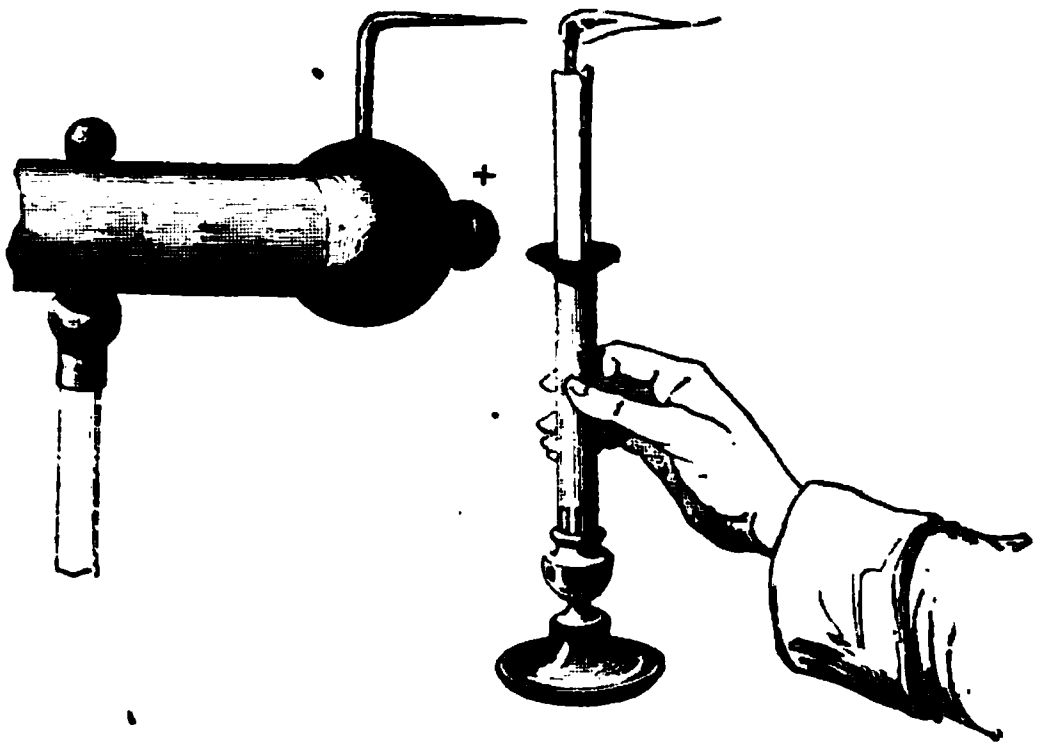


Fig. 292.

près de l'extrémité, on sent un courant d'air très-vif, et, en présentant la flamme d'une bougie à ce courant d'air (*fig.* 292), on le voit courber la flamme et souvent l'éteindre.

Si au contraire la pointe est mobile, et qu'elle puisse obéir à la force répulsive qui s'exerce entre elle et l'air électrisé ambiant, on la voit se mouvoir en sens inverse. Ce sont là les conditions réalisées dans le *tourniquet électrique :* cet appareil, représenté par la figure 293, se compose de plusieurs tiges métalliques horizontales, terminées toutes par des pointes courbées dans le même sens; ces tiges sont fixées dans une chape centrale, mobile sur un petit pivot métallique C; le pivot est isolé du sol, et on le fait communiquer, par exemple au moyen d'une chaîne métallique A, avec une source continue d'électricité. L'appareil se met en mouvement en sens inverse de la direction des pointes, c'est-à-dire dans le sens des flèches qu'indique la figure. — Le mouvement, bien qu'il se produise ici dans le même sens que pour le tourniquet hydraulique (79), doit être, comme on voit, expliqué d'une manière toute différente.

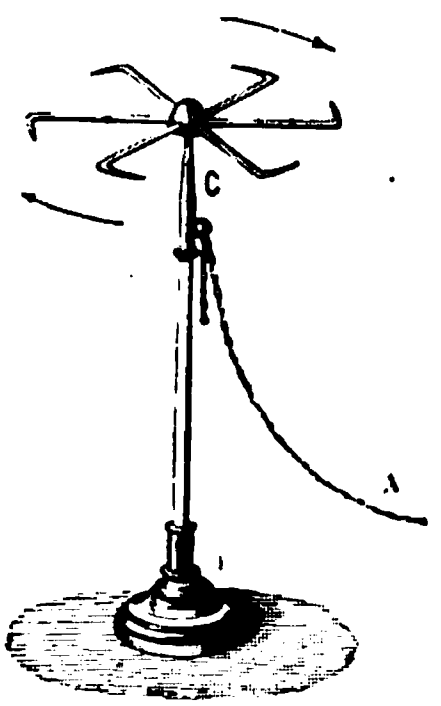


Fig. 293. — Tourniquet électrique.

IV. — DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ PAR INFLUENCE.

432. Expérience fondamentale. — Pour manifester le développement de l'électricité par influence, il suffit de mettre un corps conducteur à l'état naturel en présence d'un corps électrisé. La disposition représentée par la figure 294 est spécialement commode pour étudier les diverses particularités du phénomène.

Un cylindre métallique BC (*fig.* 294), terminé par deux portions de sphères, est isolé par une tige de verre V du support vertical sur lequel on peut à volonté le faire monter ou descendre. Son axe est placé verticalement, et l'on a assujetti, en ses différents points, de petits pendules formés chacun d'une balle de sureau suspendue à un fil conducteur de lin. Une sphère métallique isolée A ayant été chargée d'électricité positive, par exemple, on la place au-dessous du cylindre BC : on voit immédiatement se produire la divergence des pendules, ce qui prouve que les points correspondants de la surface du cylindre sont électrisés. Mais la divergence, qui est maximum aux deux extrémités, va en décroissant à mesure qu'on approche d'une région D, qu'on appelle la *ligne neutre*, et qui est toujours plus rapprochée de l'extrémité B que de l'autre extrémité; le pendule *d* correspondant à la région D ne manifeste aucune divergence. Pour déterminer la nature des électricités développées aux autres points, on peut en approcher, par exemple, un bâton de résine *faiblement électrisé;* il attire les pendules de la région CD, et repousse ceux de la région DB. — Donc, des deux fluides dont la réunion constituait primitivement pour le cylindre BC l'état neutre, le fluide négatif, attiré par A, s'est accu-

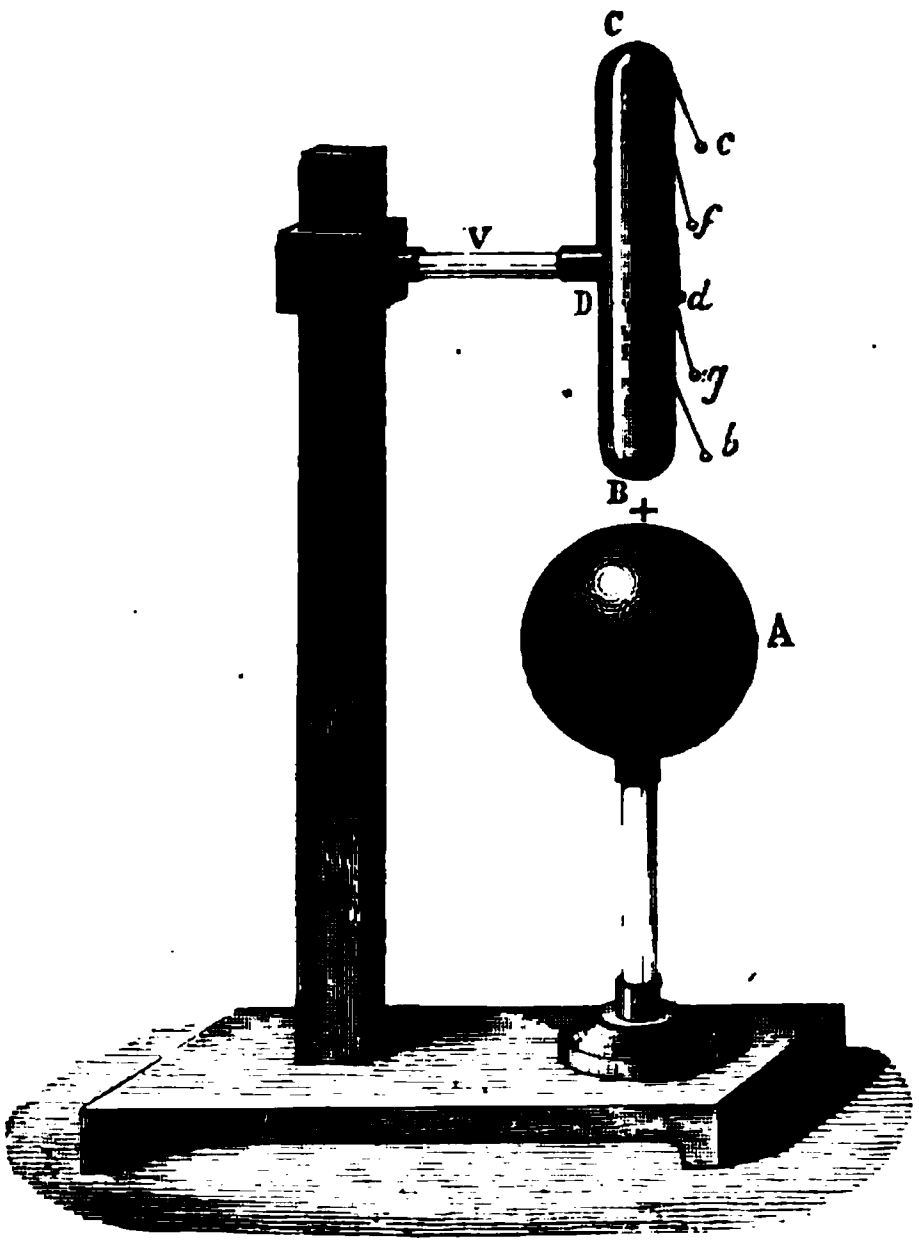


Fig. 294.

mulé en quantités croissantes vers l'extrémité B; le fluide positif, repoussé, s'est refugié vers l'extrémité C. Entre les deux régions chargées d'électricités contraires, on conçoit qu'il doit se trouver une ligne à l'état naturel.

Si, dans cette expérience, on diminue la distance de BC à A, on voit les divergences augmenter et la ligne neutre D se rapprocher un peu de A (*). — Si, au contraire, on éloigne graduellement BC de A, on voit les divergences des pendules diminuer, jusqu'à devenir nulles. Le cylindre BC n'avait donc rien gagné ni perdu : il revient à l'état neutre dès que, l'influence de A étant devenue insensible, ses fluides se réunissent à cause de leurs attractions mutuelles.

433. **Cas où le corps influencé est mis en communication avec le sol.** — Si, laissant la sphère influente A en présence du cylindre

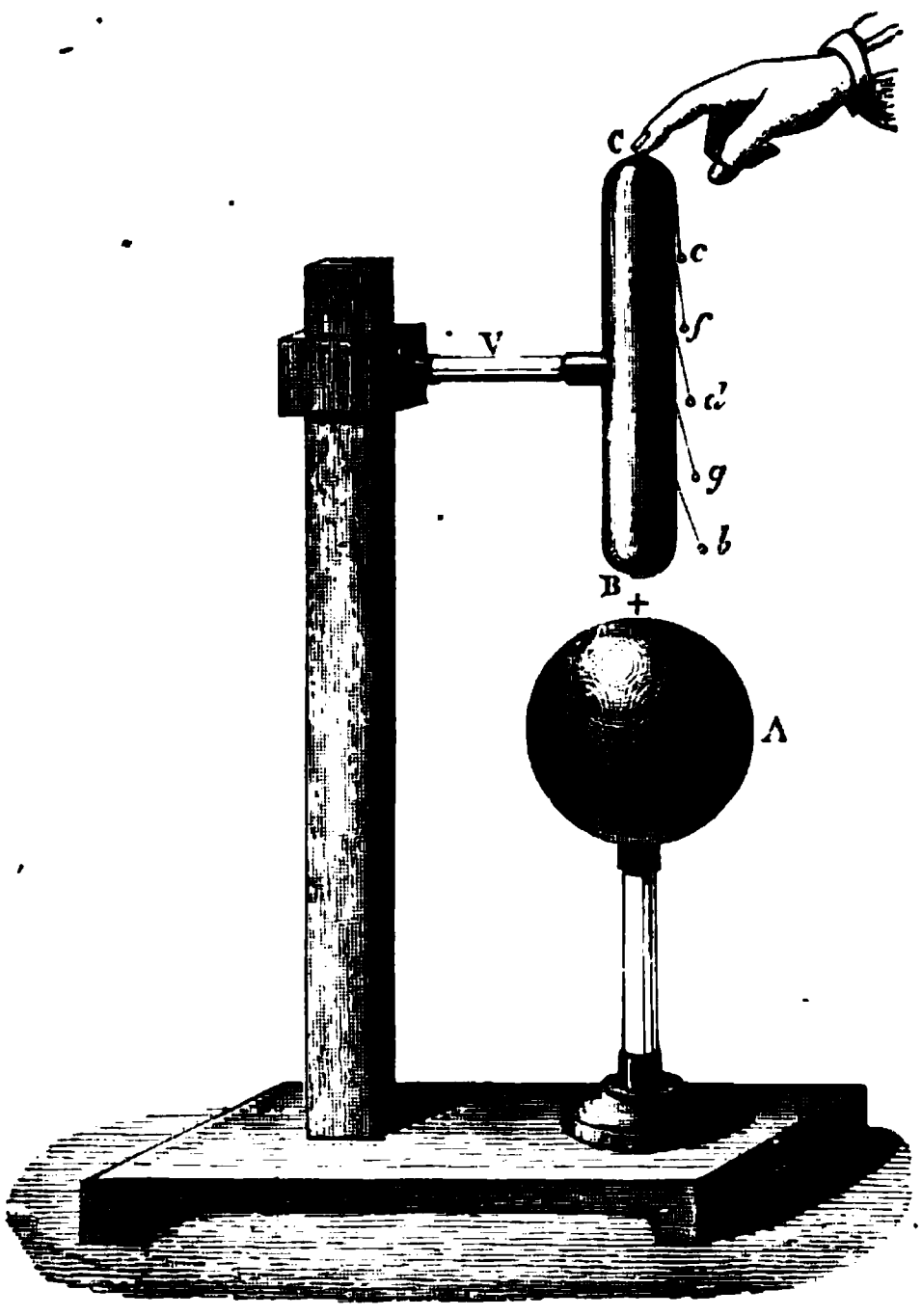


Fig. 295.

influencé BC, on met l'extrémité C en communication avec le sol, par

(*) Si la distance de BC à A décroissait au-dessous d'une certaine limite, il se produirait une étincelle, et l'état électrique de BC serait modifié; on suppose ici que ce phénomène tout particulier ne se soit pas produit : l'étude en sera faite plus loin.

exemple en la touchant du doigt (*fig.* 295), on voit les pendules de cette extrémité retomber; ceux de l'extrémité B divergent au contraire un peu plus qu'auparavant. — On comprend en effet que le fluide positif repoussé a dû être conduit dans le sol. Le fluide négatif a été maintenu en B, par l'attraction de A : il s'est même accru de celui qui doit provenir de l'action exercée par A sur la main, et en général sur le système de corps conducteurs qui font communiquer BC avec le sol (*).

Enfin, si l'on supprime la communication avec le sol, et qu'on éloigne alors la sphère A, le cylindre BC reste chargé d'électricité négative, qui se répand sur toute la surface; dans ce cas, les pendules divergent de nouveau, mais ils sont chargés d'une même électricité, l'électricité négative.

Il est bien essentiel de remarquer que le résultat aurait été le même, si, au lieu d'établir la communication avec le sol par le point C, on l'avait établie par un point quelconque et *même par le point* B, *le plus voisin de* A. — Quelle que soit la façon dont se comportent alors, au moment du contact du doigt, les fluides qui avaient été d'abord développés, le résultat définitif est d'accord avec la théorie : car le cylindre, le corps de l'expérimentateur et le sol doivent être considérés comme formant un système de corps conducteurs, dans lequel la sphère A attire le fluide négatif vers les points les plus voisins d'elle, et repousse le fluide positif vers les points les plus éloignés, c'est-à-dire dans le sol. Quand on vient à supprimer la communication, c'est donc bien l'électricité négative qui doit toujours se manifester sur le cylindre, et c'est ce que montre l'expérience (**). — Donc :

Quand on soumet un corps non électrisé à l'influence d'un corps A *électrisé, et qu'on le met en communication avec le sol par l'un* quelconque *de ses points, il reste chargé, après qu'on a enlevé la communication et le corps* A, *d'une électricité contraire à celle du corps influent.*

Cette conclusion devra être retenue avec soin : nous aurons à la rappeler dans un grand nombre de cas.

434. Étincelle électrique. — Communication de l'électricité à distance. — Dans l'expérience précédente, l'attraction exercée entre le fluide positif de A et le fluide négatif accumulé en B tend à réunir ces fluides : on conçoit donc que, si la tension acquiert une valeur suffisante, il puisse y avoir combinaison brusque à travers la couche d'air mauvais conducteur. Cette combinaison s'effectuant avec lumière et avec bruit

(*) Cette même attraction entre les fluides de A et de B modifie d'ailleurs aussi la distribution de l'électricité sur le corps influent et l'accumule vers les points les plus voisins de B, comme on peut le constater au moyen du plan d'épreuve (427) : c'est là, comme nous le verrons, une remarque importante au point de vue de la théorie des condensateurs.

(**) La communication avec le sol peut s'établir d'elle-même, pour un corps que l'on croit isolé, si les supports isolants sont humides ; le corps se charge alors d'électricité négative, s'il est en présence de sources d'électricité positive.

constitue le phénomène de l'*étincelle*. — Une fois l'étincelle produite, le résultat est le même que si l'électricité du corps influent était passée, en totalité ou en partie, sur le corps influencé. Car le corps influent a perdu une partie de sa charge, et, si le corps influencé est isolé, comme le cylindre BC dans la figure 294, on constate que, après l'étincelle, il est électrisé positivement. — L'étincelle constitue donc une sorte de *communication de l'électricité à distance*, et l'on dit en effet souvent que l'un des corps *a pris à l'autre une partie de son électricité* : on voit que, dans la théorie que nous avons adoptée, c'est là une manière abrégée d'exprimer le résultat d'un phénomène un peu plus complexe.

Si le corps influencé est muni d'une pointe dirigée vers le corps influent, le fluide attiré s'écoule successivement par la pointe et va neutraliser le fluide du corps influent. C'est ce qui arrive, par exemple, quand on présente à une machine électrique une pointe métallique en communication avec le sol ; il est impossible alors de charger la machine.

435. **Mouvements des corps électrisés.** — Les phénomènes d'influence permettent de se rendre compte des mouvements qu'on observe entre les corps électrisés. Voici à peu près la théorie qui en a été donnée par Æpinus.

1° Le cas le plus simple est celui où l'on considère un corps *mauvais conducteur* soumis à l'action d'un corps électrisé. — Si le corps mauvais conducteur est préalablement chargé de la même électricité, il y a répulsion entre les deux fluides, et par suite entre les molécules matérielles elles-mêmes, à cause de l'adhérence qui existe entre ces molécules et les fluides, dans les corps mauvais conducteurs. De même, il se produit une attraction, si les deux électricités sont contraires. — Si le corps mauvais conducteur est à l'état naturel, il n'y a ni attraction, ni répulsion, dans le premier instant : ainsi, de la gomme-laque en poudre n'éprouve aucune attraction de la part d'un corps électrisé. Ce fut là la première découverte d'Æpinus, et l'un des fondements de sa théorie ; elle démontrait en effet que la propriété d'attirer les corps légers n'est pas une propriété appartenant nécessairement aux corps électrisés. — Si enfin, dans cette dernière expérience, on laisse les corps quelque temps en présence, il y a décomposition du fluide neutre. Si la source est chargée, par exemple, d'électricité positive, le fluide négatif s'accumule dans les points du corps qui sont le plus voisins d'elle ; le fluide positif, en des points plus éloignés : alors, l'attraction de la source sur le fluide négatif devient plus grande que la répulsion sur le fluide positif, parce qu'elle s'exerce à une plus petite distance : elle se manifeste par un rapprochement.

2° Considérons maintenant le cas d'un corps *bon conducteur*, soumis à l'influence d'une source électrique. — Si ce corps conducteur est isolé et chargé d'électricité contraire à celle de la source, il y a encore attraction entre les fluides, mais il n'y a plus adhérence entre eux et les molécules matérielles, en sorte que l'explication du cas précédent ne peut plus con-

venir ici sans modification. Æpinus admet, et nous admettrons avec lui, qu'il existe à la surface de tous les corps une couche d'air, dans laquelle s'accumule l'électricité libre, et qui a pour eux une adhérence sans laquelle il est d'ailleurs impossible d'expliquer la conservation de l'électricité sur les corps conducteurs ; ces corps se trouvent ainsi dans les mêmes conditions qu'une sphère métallique couverte d'une couche de gomme-laque. C'est donc réellement le fluide accumulé sous la couche d'air qui est attiré, et c'est l'adhérence de cet air pour le corps solide lui-même qui fait que celui-ci se met en mouvement vers la source. Pour la même raison, une répulsion se manifeste quand les électricités sont de même nature. — Enfin, si le corps conducteur influencé est à l'état naturel, la décomposition du fluide neutre est instantanée et l'attraction doit être immédiate, comme le montre l'expérience.

436. **Deux corps chargés de la même électricité peuvent s'attirer quand ils sont placés à une petite distance l'un de l'autre.** — On explique d'une manière analogue l'attraction qui se produit, même entre deux corps chargés d'une même électricité, quand l'un d'eux est plus fortement électrisé que l'autre, et qu'on les place à une petite distance; il y a encore décomposition du fluide neutre dans le corps le moins chargé, et ce sont les effets de cette décomposition qui deviennent seuls manifestes. — Aussi observe-t-on, quand on approche lentement l'un de l'autre deux corps dans ces conditions, une répulsion faible tant qu'ils sont à une certaine distance, puis une attraction vive dès qu'ils sont arrivés à une distance moindre.

437. **Carillon électrique. — Grêle électrique.** — Nous rattacherons encore aux phénomènes d'électrisation par influence les deux expériences suivantes, célèbres dans l'histoire de l'électricité :

1° Aux extrémités d'une tige métallique horizontale (*fig.* 296) sont suspendus par des chaînes métalliques deux timbres T et T′; au milieu de la tige est suspendu, par un fil de soie, un autre timbre T″, qu'on fait communiquer avec le sol au moyen d'une chaîne de métal ; enfin, dans les deux intervalles que ces timbres comprennent entre eux, sont placées de petites balles métalliques *b* et *b′*, suspendues par des fils de soie. On fait communiquer la tige métallique avec une machine électrique : dès que la machine est mise en activité, on voit la balle *b* venir frapper tour à tour les timbres T et T″; en même temps, *b′* exécute un mouvement semblable de T′ à T″. Cet appareil est désigné sous le nom de *carillon électrique*. — Pour

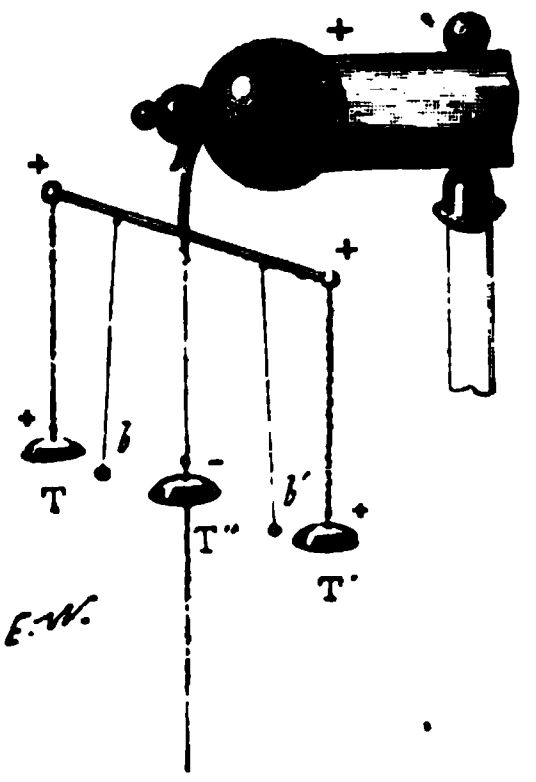


Fig. 296. — Carillon électrique.

expliquer ces mouvements, remarquons que, si les timbres T et T′ reçoivent du fluide positif de la machine, le timbre T″ qui est isolé de la tige et soumis à l'influence des deux autres se charge de fluide négatif, son fluide positif étant repoussé dans le sol. De là résulte que les balles métalliques se chargent d'abord de fluide positif en venant toucher les timbres extrêmes qui les attirent, puis elles sont repoussées par eux, et attirées par le timbre intermédiaire T″ qui est chargé d'une électricité contraire; elles viennent alors le toucher, lui cèdent d'abord leur fluide positif, puis se chargent de fluide négatif et sont repoussées, et ainsi de suite.

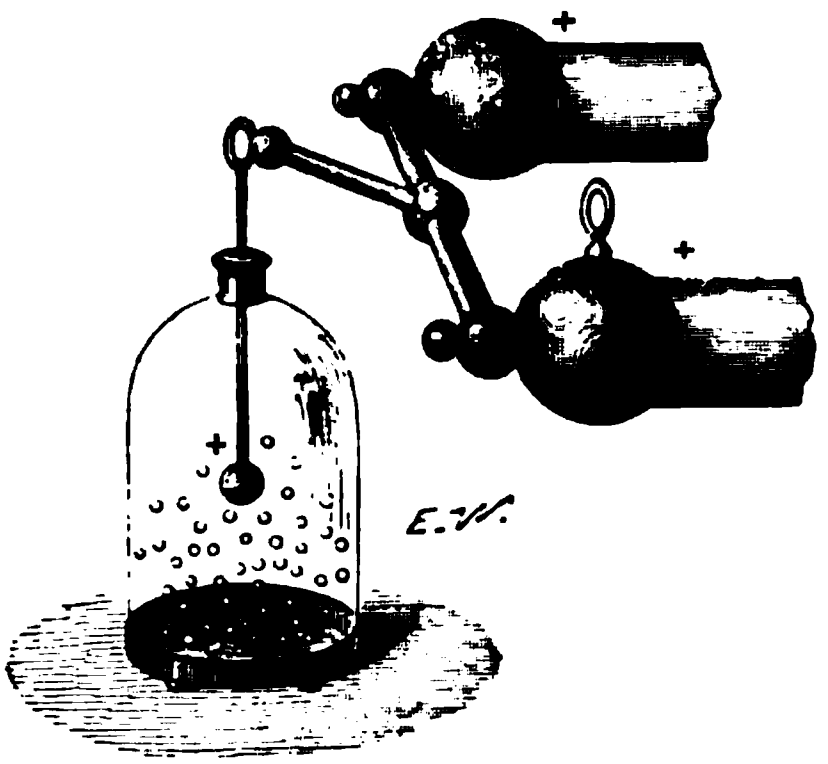


Fig. 297. — Grêle électrique

2° Dans l'axe d'une cloche de verre (*fig.* 297) est fixée une tige métallique, terminée à sa partie inférieure par une sphère; la cloche repose elle-même sur un plateau métallique, et on y a placé un certain nombre de petites balles de moelle de sureau. Si la tige communique avec une machine électrique en activité, et le plateau inférieur avec le sol, on voit les petites balles s'élever vers la sphère, retomber vers le plateau, s'élever de nouveau, et ainsi de suite. — La tige recevant du fluide positif de la machine, et le plateau se chargeant par influence d'électricité négative, on voit que le mouvement des balles de sureau s'explique exactement comme celui des balles *b* et *b′* dans l'expérience précédente. — C'est par des mouvements dus à une cause semblable, que Volta avait pensé expliquer le bruit qui se produit dans la région des nuages, avant la chute de la grêle.

438. **Électroscopes.** — On donne le nom général d'*électroscope* aux appareils qui servent à *constater le développement* de l'électricité et à en *déterminer la nature*. — Le pendule électrique que nous avons décrit, ou une petite boule de cuivre creuse, fixée à l'extrémité d'une aiguille de verre horizontale mobile sur un pivot vertical, tels furent les premiers électroscopes employés; nous avons vu déjà, dans plusieurs circonstances, quel usage on en a pu faire. — L'appareil suivant est d'une sensibilité beaucoup plus grande.

439. **Électroscope à feuilles d'or.** — L'électroscope à feuilles d'or (*fig.* 298) se compose d'une tige de métal BB′, terminée à sa partie supérieure par une boule B, et portant à sa partie inférieure deux petites feuilles d'or très-légères *a*, *b*. Cette tige est fixée dans la tubulure d'une

cloche de verre C, couverte d'un vernis isolant; on l'isole elle-même de la cloche, en la plaçant soit dans un bouchon garni de gomme-laque, soit dans l'axe d'un tube de verre assujetti dans une monture métallique (*fig.* 299). La cloche repose sur un plateau métallique qui porte, en face des feuilles d'or, deux petites colonnes métalliques *c*, *d*; l'air est maintenu sec par des fragments de chlorure de calcium.

Fig. 298. Électroscope à feuilles d'or.

Si, la tige étant à l'état naturel, on approche lentement de la boule B un corps électrisé, on observe une divergence des feuilles d'or; on comprend en effet qu'il y a dans la tige développement d'électricité par influence, et accumulation dans les deux feuilles du fluide de même nom, repoussé par le corps. En outre, les feuilles, agissant également par influence sur les colonnes métalliques *c*, *d*, sont attirées par elles, et la sensibilité de l'instrument est ainsi augmentée (*). Si l'on éloigne le corps, toute divergence cesse; cette expérience sert donc uniquement à constater que ce corps était électrisé.

Pour savoir de quelle électricité un corps est chargé, on charge préalablement l'électroscope d'une électricité connue. A cet effet, on approche, par exemple, de l'instrument un bâton de résine électrisé négativement, tandis qu'on touche du doigt le bouton B (*fig.* 299); l'électricité positive de la tige et des feuilles d'or, attirée par la résine, est maintenue en B, tandis que l'électricité négative est repoussée dans le sol (433). Pendant cette opération, les feuilles d'or demeurent verticales; mais, si l'on enlève le doigt, et qu'on éloigne ensuite le bâton de résine, elles divergent, parce qu'une portion de l'électricité positive, primitivement retenue en B, se répand sur la tige et sur les feuilles; l'instrument se trouve ainsi chargé d'électricité positive, c'est-à-dire d'une électricité *contraire à celle du corps qu'on a employé pour le charger*.

Fig. 299.

L'électroscope étant ainsi chargé d'une électricité connue, et, dans le cas actuel, d'électricité positive, on approche *lentement* de la boule B le corps qui est l'objet de l'expérience. — S'il déter-

(*) Ces colonnes servent encore, dans le cas où la divergence des feuilles devient trop grande, à les empêcher de venir toucher la cloche; on conçoit que, si ce contact avait lieu, le verre restant alors chargé d'électricité, les indications de l'instrument

mine un rapprochement des feuilles d'or, c'est qu'il attire une partie de leur électricité dans la boule; ce corps est donc lui-même chargé d'électricité négative.—Si, au contraire, il détermine une divergence, c'est qu'il repousse dans les feuilles une partie de l'électricité répandue sur le bouton B et sur la tige : ce corps est donc chargé d'électricité positive.

Toutefois, cette dernière expérience doit être faite avec soin, si l'on ne veut pas être induit en erreur. — Supposons, en effet, qu'en approchant très-lentement le corps soumis à l'expérience, on ait vu diminuer la divergence des feuilles; en continuant à l'approcher successivement, on verra les feuilles arriver au contact, puis diverger de nouveau, et de plus en plus fortement, à cause de la décomposition du fluide neutre de la tige : si donc on avait approché le corps trop brusquement, il aurait pu se faire qu'on n'observât qu'une divergence, et qu'on fût induit en erreur sur la nature de l'électricité de ce corps. De là cette conséquence, qu'on ne doit pas conclure d'après l'observation d'*une divergence seule*, et qu'il est préférable, dans ce cas, de décharger l'électroscope, pour le charger d'une électricité contraire et faire la contre-épreuve. — Enfin, l'observation d'*un rapprochement seul* ne peut non plus être absolument concluante; car, si le corps soumis à l'expérience était à l'état naturel, il produirait aussi ce résultat. — En résumé, il n'est permis de regarder la conclusion comme certaine, que dans le cas où elle a été fournie par un *rapprochement observé*, *suivi d'une divergence*; ce résultat peut d'ailleurs toujours être obtenu, en choisissant convenablement la source qui sert à charger l'instrument (*).

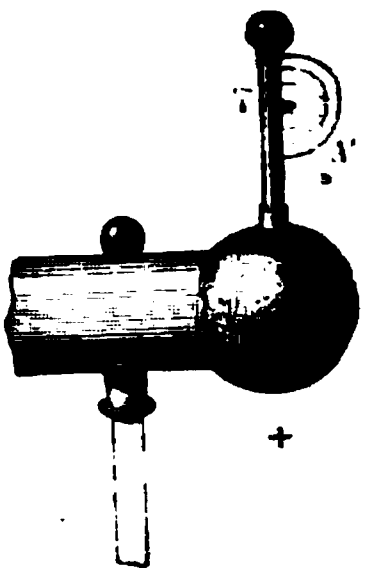


Fig. 300.

440. Électromètre de Henley. — Ce petit instrument (*fig.* 300) est destiné à être placé sur les machines électriques ou les batteries, pour donner une idée et une sorte de mesure de leur charge. Il se compose d'un cylindre conducteur T, qui porte une petite tige d'ivoire, mobile autour de son point de suspension sur un cadran d'ivoire, et portant une petite balle de sureau A. Si l'instrument est placé sur un corps électrisé, la balle

pourraient être complétement modifiées, et pendant un temps assez long. Au contraire, si les feuilles viennent toucher les colonnes, leur électricité est transmise dans le sol par le plateau métallique, et l'instrument est simplement déchargé.

(*) Au lieu de la méthode que nous venons d'exposer, on indique quelquefois la suivante. On charge l'électroscope avec le corps qui est l'objet de l'expérience, en lui présentant ce corps lui-même et touchant la boule B avec le doigt; on sait que la tige reste alors chargée d'une électricité contraire (433). Il suffit donc de déterminer ensuite la nature de l'électricité de l'instrument, avec un corps chargé d'une électricité connue. — On voit que cette méthode n'exempte d'aucune des précautions exigées par la précédente; elle présente, en outre, cet inconvénient que, en électrisant l'appareil avec un corps dont on ne connaît pas la charge, on s'expose à lui communiquer une tension trop considérable, et même à briser les feuilles d'or.

s'écarte en A', et la tige d'ivoire fait avec le support T un angle qui augmente avec la charge, sans lui être proportionnel.

V. — MACHINES ÉLECTRIQUES

441. Machine électrique ordinaire, de Ramsden. — La figure 501 représente la machine électrique la plus ordinairement employée.

Fig. 501. — Machine électrique.

— C'est à Ramsden qu'on en attribue la première idée : nous la décrirons telle qu'on la construit aujourd'hui, avec les perfectionnements qu'on y a successivement apportés.

L'électricité se produit sur un plateau de verre circulaire PP′, qui tourne autour d'un axe fixé perpendiculairement en son centre, et qui est mis en mouvement par une manivelle G : les différents points du plateau viennent passer successivement entre deux paires de coussins BB, B′B′, assujettis entre des montants de bois verticaux. Ces coussins sont, dans les anciennes machines, en cuir rembourré de crin ; on les enduit d'or mussif (bisulfure d'étain). On leur substitue souvent des frottoirs qui consistent en des plaques de bois recouvertes de plusieurs doubles d'étoffes, et enduits d'un amalgame métallique. Ces coussins doivent toujours presser exactement le plateau ; pour cela, ils sont garnis soit de ressorts, soit de vis de pression qui peuvent être serrées au besoin : ils communiquent avec le sol au moyen d'une chaîne métallique M. — Dans un plan horizontal, et à la hauteur du centre du plateau, sont des cylindres métalliques C, C′, isolés par des pieds de verre vernis à la gomme-laque, et qu'on nomme les *conducteurs* de la machine : leurs extrémités voisines du plateau portent deux espèces de fer à cheval métalliques ou *mâchoires* F, F′, qui embrassent le plateau et qui sont garnis, sur leurs deux branches, de pointes tournées du côté du verre.

On s'explique le jeu de la machine électrique en partant des principes de l'électrisation par influence. — Les divers points du plateau de verre se chargent successivement d'électricité positive, en passant entre les coussins ; arrivés entre les mâchoires, ils décomposent par influence le fluide neutre des conducteurs, attirent le fluide négatif et repoussent le fluide positif. Ce dernier s'accumule donc vers les points des conducteurs les plus éloignés du plateau ; le fluide négatif, au contraire, se porte vers les pointes dont les mâchoires sont armées, s'écoule par ces pointes et vient se combiner avec l'électricité positive du plateau. — L'effet du plateau sur les conducteurs consiste donc à rendre libre leur électricité positive, en enlevant, d'une manière continue, l'électricité négative qui la neutralisait.

442. **Limite de charge de la machine.** — Il est évident que la quantité d'électricité positive développée sur les conducteurs doit aller d'abord en croissant ; elle ne peut cependant pas augmenter au delà d'une certaine limite. — Pour nous en rendre compte, nous supposerons d'abord qu'il ne puisse se faire aucune déperdition d'électricité, ni par l'air, ni par les pieds de verre qui supportent les conducteurs. D'après ce qui précède, chaque portion du plateau, après avoir franchi les mâchoires, est remplacée par une autre qui apporte la même quantité d'électricité ; l'effet définitif est donc le même que si le plateau, restant immobile, conservait une charge constante, et que le fluide négatif des conducteurs fût enlevé par quelque autre moyen. Dans ces conditions, le fluide positif déjà développé sur les conducteurs repousse le fluide de même nom, que l'action décomposante du plateau tend à y accumuler encore : cette répulsion est d'ailleurs d'autant plus forte que les conducteurs sont plus

chargés; il arrive nécessairement un moment où elle fait équilibre à l'action décomposante du plateau, et alors la limite de charge est atteinte.

Mais plusieurs causes, à l'influence desquelles il est impossible de se soustraire d'une manière complète, tendent à rendre cette limite moins reculée qu'elle ne semble devoir l'être d'abord. — Telle est surtout la déperdition de l'électricité des conducteurs par l'air et par les supports, qui augmente avec la charge elle-même (424) : on peut la diminuer en plaçant des fourneaux sous les conducteurs, pour dessécher l'air qui les environne, et en essuyant les pieds de verre avec un linge chaud et sec ; ces précautions sont indispensables surtout quand l'air est humide, mais elles n'empêchent jamais complétement la déperdition. — Le fluide positif développé sur le plateau de verre se perd aussi, dans le temps que met chacun des points du plateau pour parvenir d'une paire de coussins à la mâchoire suivante : pour atténuer cette cause de déperdition, on place sur ce trajet des quarts de cercle D, D′, qui sont formés chacun de deux feuillets de taffetas de soie, dans l'intervalle desquels passe le plateau.

Enfin, on conçoit la nécessité de faire communiquer les coussins avec le sol au moyen de la chaîne métallique M, afin que le fluide négatif qui s'y produit s'écoule toujours instantanément, et qu'il ne puisse se communiquer au plateau pour en diminuer la charge : aussi est-il important de s'assurer toujours que l'extrémité libre de cette chaîne communique avec une partie du sol conduisant bien l'électricité (*).

Quand toutes ces précautions sont bien prises et que l'air n'est pas trop humide, on peut, si la machine est un peu puissante, en tirer des étincelles de plusieurs centimètres de longueur.

443. **Machine à deux électricités, de Nairne.** — Cette machine peut être considérée comme une modification de la précédente, permettant de recueillir à volonté l'électricité du frottoir ou celle du conducteur. Le plateau est remplacé par un cylindre de verre C (*fig.* 302), mobile autour de son axe au moyen d'une manivelle ; de chaque côté sont placés, parallèlement à l'axe et à la même hauteur, deux conducteurs métalliques isolés, dont l'un D′ porte le frottoir, et l'autre D porte des pointes métalliques dirigées vers le cylindre (**). Le coussin et par suite le conducteur D′ se chargent d'électricité négative; le cylindre de verre se charge d'électricité positive, et agit par influence sur le conducteur D, dont le fluide négatif s'écoule par les pointes, tandis que le fluide positif s'accumule dans le conducteur lui-même. On peut, ici encore, diminuer

(*) Pour que cet écoulement du fluide des coussins dans le sol s'effectue aussi rapidement que possible, Faraday conseille de mettre la chaîne en communication avec les conduits du gaz d'éclairage, ou avec des conduits d'eau, qui présentent un grand développement et de nombreux points de contact avec le sol humide.

(**) Ces pointes ne sont pas visibles sur la figure 302; elles sont placées entre le conducteur D et le cylindre de verre.

la déperdition de l'électricité à la surface du verre, en couvrant le cylindre d'un morceau de taffetas fixé au bord supérieur du frottoir, comme le montre la figure.

Quand les conducteurs sont isolés tous deux, en approchant suffisamment l'une de l'autre les deux boules B, B', qui communiquent chacune

Fig. 302. — Machine électrique de Nairne.

avec l'un d'eux, on voit partir entre elles, pendant la rotation du cylindre, des étincelles dues à la recomposition des deux électricités contraires.

Lorsque l'on a pour but, comme c'est le cas le plus ordinaire, de recueillir l'une des deux électricités, on trouve un grand avantage à mettre en communication avec le sol le cylindre qui se chargerait de l'autre. — Si, par exemple, c'est le fluide positif du cylindre D qu'on veut recueillir, il est facile de voir, comme pour la machine électrique ordinaire (442), qu'il est utile de mettre en communication avec le sol le cylindre D' qui porte le frottoir. — Si, au contraire, c'est le fluide négatif de D' qu'on veut obtenir, il y a avantage à faire communiquer D avec le sol, afin que l'écoulement du fluide positif par les pointes de ce cylindre soit plus considérable et que l'électricité positive du cylindre de verre soit plus rapidement neutralisée.

* **444. Machine hydro-électrique, de M. Armstrong.** — On doit à M. Armstrong une machine électrique d'une grande puissance, dans laquelle le développement de l'électricité paraît dû au frottement exercé contre les parois d'un tube étroit, par des gouttelettes d'eau liquide entraînées dans un jet de vapeur.

Cette machine se compose essentiellement d'une chaudière isolée V (*fig.* 303), à foyer tubulaire, dont la vapeur sort par des becs d'échappement A, et vient se porter sur une rangée de pointes métalliques P, sup-

Fig. 303. — Machine hydro-électrique de M. Armstrong.

portées par une tige conductrice isolée T (*). — La boite réfrigérante D, que la vapeur traverse avant de s'échapper, est représentée à part et à

(*) La figure 303 montre, sur la chaudière à vapeur, en o, un tube de verre latéral au moyen duquel on connaît le niveau de l'eau dans la chaudière ; en S, une soupape de sûreté, réglée de façon que la pression de la vapeur atteigne à peu près huit atmosphères ; en R, le robinet par lequel on amène la vapeur dans la boîte réfrigérante.

une échelle plus grande par la figure 304, vue en-dessus, et débarrassée de son couvercle : on voit que la vapeur, arrivant du côté R, traverse trois tubes métalliques I, I, I, qui sont entourés d'étoupe mouillée (*) ; une partie de la vapeur s'y condense, et se transforme en une sorte de brouillard qui est entraîné dans les becs d'échappement A. L'un de ces becs est

Fig. 304. Fig. 305.

représenté en coupe par la figure 305 : le tube intérieur *bb* est en bois de buis, le reste de la pièce est en cuivre ; la vapeur suit la route sinueuse qui est marquée par les flèches. — Si la chaudière contient de l'eau *distillée*, l'expérience montre que les becs d'échappement et la chaudière elle-même se chargent d'électricité positive : le jet de vapeur se charge d'électricité négative, et communique cette électricité aux pointes P et à la tige isolée T.

Faraday, auquel on doit une étude complète de cette machine, a constaté que les conditions précédentes sont les meilleures pour obtenir un effet maximum. — Il est indispensable que l'eau dont est chargée la chaudière soit de l'eau distillée : l'eau ordinaire, ou l'eau tenant en dissolution des substances qui la rendent plus conductrice, ne donne, selon Faraday, aucun dégagement d'électricité. — Des jets de vapeur sèche, c'est-à-dire de vapeur entièrement gazeuse et ne contenant pas de gouttelettes liquides en suspension, ne produisent non plus aucun résultat. — Enfin, quand on substitue d'autres substances au bois de buis qui constitue le tube *bb*, on obtient sur les becs des tensions variables, le signe de l'électricité demeurant constant : c'est toujours le buis qui a donné la tension maximum (**).

Cette machine, alors même qu'elle est construite dans de petites dimensions (80 centimètres de longueur environ), fournit de l'électricité qui acquiert rapidement une *tension* comparable à celle des machines précédentes ; elle est cependant en général un peu inférieure, sous ce rapport,

(*) On maintient l'étoupe constamment mouillée, en versant de l'eau dans le fond de la boîte : le tube de verre *n* (*fig* 303) permet de s'assurer qu'il y en a toujours une quantité suffisante ; la vapeur produite par l'échauffement de cette eau se dégage par le tube E, dans la cheminée C.

(**) Faraday a constaté également que des jets d'air comprimé et sec ne donnent aucun dégagement d'électricité. — L'air humide, l'air chargé de gouttelettes des divers liquides autres que de l'eau, ou de poussières solides diverses, peuvent au contraire donner des résultats, mais le signe de l'électricité dont se chargent les becs dépend de la nature des corps en suspension.

aux bonnes machines à plateau de verre. — Elle leur est au contraire de beaucoup supérieure, sous le rapport de la *quantité* d'électricité qu'elle produit dans un temps déterminé. Ainsi, elle peut facilement donner une série *continue* de larges étincelles, dont la longueur dépasse un décimètre. — On a pu en accroître considérablement la puissance, en augmentant les dimensions de l'appareil.

445. Électrophore. — L'électrophore (*fig.* 306) est une sorte de machine électrique d'une extrême simplicité. C'est un disque ou *gâteau* de résine, coulé dans un moule de bois ou de métal, et sur lequel on pose un plateau de bois d'un plus petit diamètre, couvert d'une feuille d'étain ; ce plateau est muni, en son milieu, d'un manche de verre isolant.

On charge d'électricité négative le gâteau de résine, en le frappant avec une peau de chat bien sèche ; puis on y place le plateau métallique, dont le fluide neutre est décomposé par influence, le fluide négatif étant repoussé vers la face supérieure (*fig.* 307). Le fluide positif est attiré vers la face inférieure : il n'est pas sensiblement neutralisé par le fluide négatif de la résine,

Fig. 306. — Électrophore.

Fig. 307.

parce que la résine n'est pas conductrice, et que d'ailleurs le gâteau offre toujours un grand nombre d'aspérités qui empêchent le contact immédiat. Si l'on approche le doigt de la face supérieure, on obtient une petite étincelle, due à la combinaison du fluide négatif de cette face avec le fluide positif de la main. Le plateau reste donc chargé de fluide positif, maintenu sur sa face inférieure, et ce fluide se répand sur ses deux faces lorsqu'on le soulève par le manche de verre (*fig.* 308). Le plateau peut alors donner une étincelle quand on en approche le doigt, ou servir à charger d'électricité un appareil quelconque.

Fig. 308.

Le gâteau de résine, une fois électrisé par le frottement, peut servir presque indéfiniment à développer de l'électricité positive dans le pla-

teau. Il suffit, en effet, de replacer celui-ci sur le gâteau, de le mettre en communication avec le sol et de l'enlever par le manche de verre, pour y constater un nouveau développement d'électricité ; et ainsi de suite presque indéfiniment, si l'air est bien sec. — L'électrophore est la machine électrique des laboratoires de chimie ; lorsqu'on l'emploie à charger une bouteille de Leyde, on peut encore obtenir des effets assez intenses.

446. **Machine électrique de M. Holtz.** — L'électrophore présente, comme on vient de le voir, ceci de particulier, qu'il permet, avec une quantité finie d'électricité développée par le frottement, d'obtenir successivement une quantité à peu près indéfinie d'électricité dans les appareils que l'on met en communication avec le plateau supérieur : c'est, à proprement parler, le travail employé à produire les mouvements alternatifs du plateau qui se transforme en électricité, sans qu'il y ait disparition d'une quantité

Fig. 309. — Machine électrique de Holtz.

appréciable de la charge préalablement communiquée au gâteau de résine. — C'est dans cette façon d'envisager la théorie de l'électrophore, qu'on peut trouver l'origine de diverses machines électriques, de construction beaucoup plus récente, et parmi lesquelles nous citerons celle de M. Holtz et celle de M. Bertsch.

La machine de M. Holtz, telle que la construit aujourd'hui M. Ruhmkorf (*fig.* 309), présente deux plateaux de verre circulaires A, B, placés parallèlement l'un à l'autre, à une distance de quelques millimètres. L'un d'eux A, d'un diamètre un peu plus grand, est assujetti dans une position fixe, entre quatre galets de bois. L'autre B, plus petit, est mobile autour d'un axe passant par son centre ; la rotation se produit au moyen de la manivelle M et des roues R, R′, R″, reliées entre elles par des courroies sans fin. En regard de la face de B qui est opposée à A, sont disposés deux peignes métalliques P, P′, placés de part et d'autre de l'axe de rotation, sur un même diamètre horizontal, et communiquant avec des conducteurs métalliques C, C′ : ces conducteurs sont terminés par des boules *m* et *n*, dont on peut régler à volonté la distance en faisant glisser la tige C*m*. Le plateau de verre B n'offre aucune solution de continuité : dans le plateau A, sont pratiquées deux fenêtres F, F′, en forme de secteurs circulaires : dans la figure 309, on aperçoit ces fenêtres par transparence, au travers du plateau B ; la figure 310, qui représente le plateau A seul, montre en outre deux bandes de carton *b*, *b′*, collées près du bord inférieur de l'une

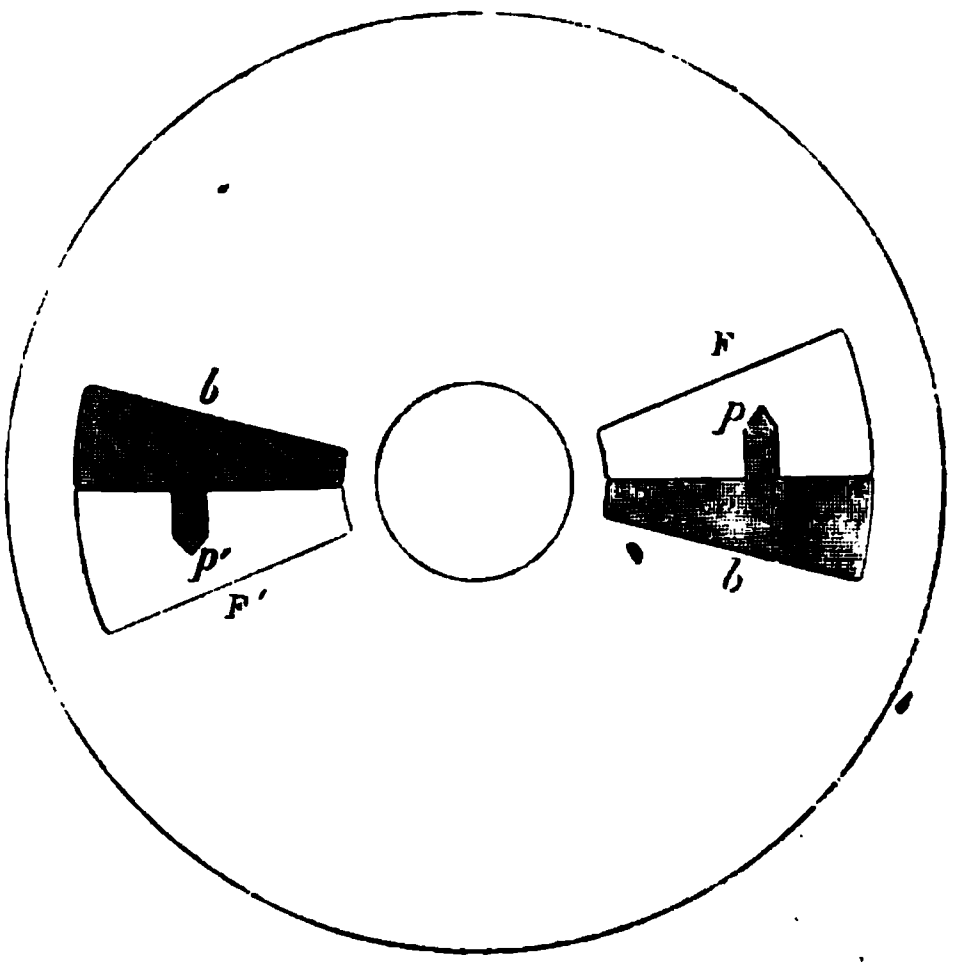


Fig. 310.

des fenêtres et près du bord supérieur de l'autre, et terminées chacune par une pointe de carton mince *p*, *p′*. — Pour faire fonctionner la machine, on approche de l'une des bandes de papier, *b* par exemple, un bâton de résine électrisé, et, la boule *m* ayant été amenée en contact avec *n*, on met en mouvement le plateau B : après lui avoir fait faire quelques tours, on éloigne *m* de *n*, à quelques centimètres, et l'on obtient, en con-

tinuant le mouvement de rotation toujours dans le même sens, une série continue d'étincelles énergiques entre les deux boules, pendant un temps presque indéfini, si l'air ambiant est bien sec. — En mettant les deux boules à une distance telle, que les étincelles ne puissent plus jaillir de l'une à l'autre, on peut se servir de l'un des conducteurs pour charger d'électricité un corps quelconque.

Voici comment on peut se rendre compte de la production de l'électricité dans cette machine. La bande *b*, chargée d'électricité négative par le bâton de résine, agit par influence, au travers du plateau B, sur le peigne voisin P : par les pointes de ce peigne s'écoule du fluide positif qui se porte sur la face extérieure du plateau mobile B, tandis que la boule *n* qui termine le conducteur auquel ce peigne est fixé se charge de fluide négatif : comme le mouvement du plateau mobile amène ensuite des parties nouvelles dans la région où cette action s'effectue, elle se continue avec la même intensité. D'autre part, les points du plateau qui se sont ainsi chargés de fluide positif arrivent devant la bande de papier *b'*, agissent sur elle par influence, et, à cause de la pointe *p'*, y développent du fluide positif ; en même temps, le plateau reçoit, sur sa face interne, une quantité de fluide négatif à peu près égale à la quantité de fluide positif que contenait sa face externe, et alors, à cause de sa minceur, il se comporte comme s'il était à l'état naturel. Mais la bande de papier *b'*, électrisée positivement, agit sur le peigne P' comme *b* agissait sur P, c'est-à-dire qu'elle charge le conducteur correspondant *m* de fluide positif ; le fluide négatif écoulé par les pointes est recueilli par le plateau, en sorte qu'il vient agir à son tour sur la bande de papier *b*, et ainsi de suite.

447. **Machine électrique de M. Bertsch.** — La machine de M. Bertsch (*fig.* 311) ne contient qu'un plateau ; il est en caoutchouc durci, et on le met en mouvement au moyen d'un système de roues, semblable à celui de la machine de Holtz ; en face de ce plateau et aux extrémités d'un même diamètre, se trouvent encore deux peignes P, P', communiquant chacun avec un conducteur, C, C'.

Le corps dont l'influence détermine le développement de l'électricité pendant la rotation du plateau est ici un secteur fixe de caoutchouc durci, placé en B, en regard de l'un des peignes, mais séparé de lui par le plateau mobile ; il suffit de frotter ce secteur avec la main sèche, pour lui communiquer une charge qui a pour effet, pendant la rotation du plateau, la production d'un flux continu d'étincelles entre les conducteurs C et C'. Lorsque les conducteurs sont éloignés l'un de l'autre, l'un d'eux peut servir à charger un corps d'électricité.

On voit ici que le secteur B, électrisé négativement, doit agir par influence, au travers du plateau, sur le peigne P', repousser le fluide négatif dans le conducteur C', et attirer le fluide positif dans les pointes qui le laissent écouler sur le plateau. Les points du plateau ainsi chargés positivement arrivent ensuite en face du peigne P, repoussent du fluide

positif dans le conducteur C, et attirent dans les pointes le fluide négatif qui s'écoule sur le plateau lui-même : ces points du plateau reviennent donc alors à l'état naturel, et ils peuvent, en repassant devant B, donner

Fig. 311. — Machine électrique de Bertsch.

lieu à la même série de phénomènes. — L'expérience a montré que l'on augmente beaucoup l'intensité des décharges, en mettant en communication, avec le conducteur C, un autre conducteur D offrant une surface considérable.

VI. — CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ. — APPAREILS CONDENSATEURS.

448. Principe fondamental de la condensation. — Soit un corps conducteur isolé quelconque, par exemple un plateau métallique A (*fig.* 312) supporté par un pied de verre : si l'on fait communiquer ce corps, au moyen d'un conducteur métallique M, avec une machine électrique fournissant de l'électricité positive, le plateau se charge d'électri-

cité, et il arrive un moment où une molécule de fluide m située dans le conducteur, éprouvant la même répulsion de la part du fluide de A et de la part du fluide de la machine, reste en équilibre. On dit alors que le corps A est arrivé à sa limite de charge, pour les conditions de l'expérience. — Si maintenant on met en présence de A un autre plateau semblable B (*fig.* 313), communiquant avec le sol, il y a décomposition par influence du fluide neutre de B (432), et attraction du fluide négatif sur la face interne de ce plateau, c'est-à-dire sur celle qui regarde le plateau A. Or, en même temps, l'action de ce fluide négatif de B modifie la distribution du fluide positif sur A, et en attire une plus grande partie à la face interne, c'est-à-dire à la face qui regarde B; de là résulte une diminution de la force répulsive exercée par A sur la molécule m et sur les molécules voisines, en sorte qu'une nouvelle quantité de fluide positif peut passer sur A; à cette action, il faut ajouter d'ailleurs l'attraction du fluide négatif de B sur tout le système formé par la machine et le plateau A; de sorte qu'il y a, par le seul fait de la présence du plateau B communiquant avec le sol, accumulation ou *condensation* d'électricité positive sur le plateau A.

Fig. 312. Fig. 313.

Tel est le principe fondamental de la condensation : on voit qu'il se déduit immédiatement du développement de l'électricité par influence. On peut d'ailleurs le vérifier par l'expérience, en supprimant la communication entre le plateau A et la machine, éloignant B, et comparant, à l'aide du plan d'épreuve, la charge acquise par un des points de A, à celle qu'il acquiert sans l'intervention du plateau B.

L'appareil que nous venons d'étudier, et qui fut imaginé en 1760 par Æpinus, est un *condensateur;* le plateau qui communique avec la machine se nomme *plateau collecteur*; celui qui communique avec le sol porte le nom de *plateau condensateur*.

449. **Condensateur à lame de verre.** — En rapprochant de plus en plus les plateaux A et B (*fig.* 313), on accroît évidemment la condensation, et par la suite la charge; mais si la distance devient assez petite pour que l'attraction des deux fluides accumulés sur les faces internes surmonte la résistance de l'air, il part une étincelle, et les électricités se recomposent. Il y a donc avantage à placer, entre les deux plateaux A et B, une lame de verre C (*fig.* 314), vernie à la gomme-laque, qui offre une résistance plus grande et contre laquelle on pourra appliquer les deux

plateaux métalliques. Cependant, ici encore, si l'attraction des fluides accumulés devient capable de surmonter la résistance de la lame, l'étincelle jaillit et perce le verre.

450. Limite de charge d'un condensateur. — En supposant que la lame isolante d'un condensateur ait une résistance suffisante pour empê-

Fig. 314. — Condensateur à lame de verre. Fig. 315.

cher la combinaison des fluides qui y sont accumulés, il est facile de montrer que la charge de l'appareil doit cependant avoir encore une limite.

Et d'abord le fluide négatif attiré à la face interne du plateau B par l'influence du plateau A (*fig.* 315) doit être en quantité moindre que le fluide positif de A ; car, puisqu'il y a équilibre dans le conducteur S qui établit la communication avec le sol, il faut que la résultante des actions contraires exercées par B et A sur une molécule de fluide quelconque située dans ce conducteur soit nulle : et, comme le fluide de B est à une distance moindre que celui de A, il faut aussi qu'il soit en quantité moindre.

Dès lors, la résultante des actions exercées par le système des deux plateaux sur une molécule m de fluide positif placée dans le conducteur qui le réunit à la source est une action répulsive, semblable à celle que pourrait éprouver cette même molécule, si, le plateau A ayant été employé seul, on lui avait communiqué seulement une fraction de sa charge positive actuelle. — L'expérience montre d'ailleurs que le plateau A seul paraît électrisé. Car, si l'on a fixé de petits pendules aux faces externes des deux plateaux, on voit celui de A diverger seul (*fig.* 315) ; celui de B reste au repos. Cependant les deux plateaux A et B contiennent l'un et l'autre une charge considérable ; car si l'on vient à les éloigner après les avoir isolés, on voit les deux pendules diverger très-fortement (*fig.* 314) ; ils reviennent à leurs situations primitives, si l'on applique de nouveau les deux plateaux sur la lame de verre.

Portons maintenant notre attention sur ces deux résultats : 1° que tout se passe, relativement aux corps qui communiquent avec B, comme si B n'était pas chargé ; 2° que tout se passe, relativement aux corps qui communiquent avec A, comme si A était seul et ne possédait qu'une partie de sa charge actuelle. — D'après cela, il est facile de concevoir : 1° comment on a été conduit à donner à l'électricité de B l'épithète, assez impropre d'ailleurs, de *dissimulée* ; 2° comment on a pu considérer l'électricité de A comme composée de deux parties : l'une située à la face interne, dont l'action sur les points extérieurs est neutralisée par celle de B, et qui peut prendre, dans le même sens que plus haut, le nom d'électricité *dissimulée* ; l'autre située sur tout le plateau, dont la force répulsive se manifeste sur le fluide des conducteurs de la machine, et qu'on a nommée électricité *libre* (*).

En employant le langage dont nous venons d'indiquer le sens, on peut dire que le plateau A doit cesser de recevoir du fluide de la machine, lorsque sa charge sera devenue telle, que la répulsion de son électricité libre sur une molécule quelconque *m* du conducteur soit égale à celle de la machine elle-même. — On voit que, pour un condensateur déterminé, il y a avantage à employer une source ayant une tension aussi grande que possible, pourvu que la lame isolante ait une résistance assez considérable.

* 451. **Détermination expérimentale de la force condensante.** — On appelle *force condensante* le rapport de la charge que la machine peut communiquer au plateau collecteur quand il fait partie du condensateur, à celle qu'elle donnerait à ce même plateau employé seul.

M. Riess, en mesurant cette quantité, pour un même condensateur dans des conditions diverses, au moyen de la balance de Colomb, a reconnu que la force condensante augmente, toutes choses égales d'ailleurs, à mesure que la distance des plateaux diminue : elle augmente aussi avec le diamètre des plateaux et varie avec la nature de la lame isolante.

452. **Décharge successive d'un condensateur.** — Le condensateur à lame de verre ayant été chargé comme nous l'avons dit, et les communications avec la machine et avec le sol ayant été interrompues, si l'on approche le doigt du plateau A, qui contient de l'électricité libre (*fig.* 316), on en tire une petite étincelle ; aussitôt le pendule de ce plateau tombe au repos, et celui du plateau B diverge. — On voit, en effet, que le contact du doigt a dû enlever sur le plateau A une partie du fluide positif qu'il contenait, et qui attirait le fluide négatif à la face interne de B : dès lors, une partie de ce fluide négatif de B a dû devenir libre, et produire la divergence du pendule de ce côté.

(*) Il faut bien remarquer que ces deux locutions sont uniquement destinées à représenter les deux faits sur lesquels nous avons insisté, et n'indiquent, en aucune façon, que l'électricité doive être considérée comme étant à un état particulier quelconque.

En touchant maintenant le plateau B, on obtient de même une petite étincelle, et le pendule de B retombe, tandis que celui de A diverge. L'explication précédente est évidemment encore applicable, puisque les rôles des deux plateaux sont simplement intervertis.

En continuant à toucher alternativement l'un et l'autre plateau, on remarque que les étincelles deviennent de plus en plus faibles, et partent à des distances qui vont toujours en diminuant : il est facile de voir, en effet, que les quantités d'électricité mises en liberté par chacun de ces contacts doivent être de plus en plus petites, et que, par suite, la tension de cette électricité libre, dont dépend la distance d'explosion, doit devenir de plus en plus faible. — Enfin, théoriquement, on ne doit jamais arriver ainsi à décharger complétement le condensateur, puisqu'on n'enlève, à chaque contact, qu'une fraction du fluide restant : l'expérience prouve en effet que, si l'air est bien sec, on peut répéter les contacts un très-grand nombre de fois et obtenir toujours des étincelles sensibles. Nous verrons plus loin (458) comment Franklin a donné à cette expérience une forme ingénieuse et frappante, au moyen de la bouteille de Leyde.

Fig. 316.

453. **Décharge instantanée.** — La décharge instantanée s'obtient, non plus en touchant successivement l'un et l'autre plateau, mais en établissant la communication entre eux par un corps conducteur. C'est ce qu'on peut faire, par exemple, en appliquant une main sur l'un des plateaux, et venant toucher l'autre plateau avec l'autre main ; mais la combinaison des deux fluides à travers le corps humain produit alors une commotion, qui est le plus souvent assez pénible, et qui peut même être dangereuse si le condensateur est fortement chargé. — On préfère donc se servir d'un *excitateur*, semblable à celui qui est représenté en FEG dans la figure 317 : il est formé de deux arcs métalliques, articulés à charnière, et dont les extrémités libres sont terminées par des boules ; on peut, dans la plupart des cas, tenir impunément avec les mains les deux branches de l'excitateur, la décharge passant tout entière par le métal qui est bon conducteur, plutôt que par le corps humain qui l'est beaucoup moins. Quand on veut décharger des condensateurs très-fortement chargés, on isole l'arc métallique en le tenant, pour plus de sûreté, par des *manches de verre* (*fig.* 324).

Supposons donc qu'on mette l'une des boules F d'un excitateur en contact avec le plateau B qui ne contient pas d'électricité libre (*fig.* 317), et qu'on approche lentement l'autre boule G du plateau A. L'électricité libre de A, agissant par influence sur la boule G, attire du fluide négatif vers cette extrémité, et repousse du fluide positif dans l'arc métallique, jusque

sur le plateau B ; il peut y avoir ainsi neutralisation d'une partie du fluide négatif qui se trouve en B, et accroissement de la tension en A. Ces actions augmentant à mesure qu'on diminue la distance, il vient un moment où la tension en A et G est suffisante pour déterminer une étincelle. Une fois cette étincelle produite, les deux plateaux ayant perdu une même quantité d'électricité, le plateau A contient une nouvelle quantité d'électricité libre, plus petite que la première ; il semble donc qu'une nouvelle étincelle doive partir si l'on approche davantage la boule G ; puis une troisième en la rapprochant encore, et ainsi de suite. — Ce n'est pas tout à fait ainsi que les choses se passent en réalité ; il n'y a pas cette discontinuité dans les étincelles, mais production d'une seule étincelle, incomparablement plus sonore et plus brillante que celles de la décharge successive. Ce résultat s'explique en remarquant que, immédiatement après la première étincelle, la couche d'air placée entre la boule et le plateau est traversée par un arc de vapeur métallique, au moyen duquel la combinaison des fluides peut continuer à s'effectuer ; cette combinaison se fait alors par une série d'étincelles, qui partent à la même distance, à des intervalles de temps inappréciables ; la présence de la vapeur métallique contribue d'ailleurs à accroître l'éclat de l'étincelle, et la couleur de la lumière varie avec la nature du métal qui forme les surfaces en présence. — On s'explique ainsi comment cette étincelle, bien qu'elle ait une longueur assez petite, puisque la distance d'explosion dépend seulement de la tension de l'électricité libre, est cependant très-sonore et très-brillante : il y a, pour l'oreille, superposition des sons d'une série d'étincelles, et, pour l'œil, superposition de leurs éclats.

Fig. 317.

La neutralisation ne peut jamais être complète après une seule décharge : en effet, lors même que tout le fluide négatif de B se porterait sur A, il resterait encore en A du fluide positif qui, agissant par influence sur B, déterminerait une nouvelle charge plus faible ; en outre, nous verrons plus loin que les fluides résident surtout sur la lame isolante, avec laquelle ils ont une grande adhérence. — Après une seule décharge, il reste donc toujours un *résidu*, qui permet d'en obtenir une seconde ou *décharge secondaire*, puis une troisième, et jusqu'à cinq ou six pour les condensateurs un peu puissants, comme ceux que nous allons maintenant étudier.

454. Carreau fulminant. — Le carreau fulminant de Franklin est un condensateur semblable aux précédents, mais les plateaux métalliques sont remplacés par des feuilles d'étain collées sur le verre (*fig.* 318). L'une des deux feuilles porte un petit prolongement qui la fait commu-

niquer avec l'anneau métallique A du cadre de bois (c'est la feuille inférieure dans la figure ci-contre ; on aperçoit le prolongement métallique c à travers la lame de verre). L'appareil, placé comme l'indique la figure, se

Fig. 518. — Carreau fulminant.

charge d'électricité positive sur la face supérieure qui communique avec la machine, et d'électricité négative sur la face inférieure qui communique avec le sol.

455. **Bouteille de Leyde.** — De tous les condensateurs, la bouteille de Leyde est le plus fréquemment employé.

La lame isolante des appareils précédents est représentée par la paroi CC d'un flacon de verre mince (*fig.* 519). L'un des plateaux est représenté par des feuilles d'or ou de clinquant A, A, ou par tout autre conducteur communiquant avec tous les points de la surface interne de la bouteille ; au milieu de ces feuilles plonge une tige de métal, terminée en pointe à sa partie inférieure, et maintenue dans le goulot de la bouteille par un bouchon enduit d'un vernis à la gomme-laque. L'autre plateau est représenté par une feuille d'étain BB, collée sur la surface externe de la bouteille, et s'élevant à peu près jusqu'au trois quarts de sa hauteur. La partie supérieure de la bouteille est couverte d'un vernis à la gomme-laque, pour isoler plus complétement la feuille d'étain de la tige métallique. — L'ensemble AA de la tige et des feuilles métalliques se nomme l'*armature intérieure* de la bouteille ; la feuille d'étain BB est l'*armature extérieure*.

Fig. 519.

Pour charger la bouteille, on la prend ordinairement à la main, par la panse, ce qui met en communication l'armature extérieure avec le sol

(*fig.* 520), puis on fait communiquer la tige, et par suite toute l'armature intérieure, avec une machine électrique. — Lorsqu'on veut simplement employer la bouteille à produire des décharges peu énergiques, on la

Fig. 520.

charge souvent en touchant un certain nombre de fois l'armature intérieure avec le plateau d'un électrophore; on recharge ce plateau après chaque contact, comme il a été dit (445).

C'est à Leyde, en 1746, que furent observés pour la première fois les effets d'un semblable condensateur, et le hasard l'offrit tout d'abord sous une forme presque identique à celle qui a été définitivement adoptée plus tard. — On rapporte que Cunéus, élève de Muschenbroeck, ayant eu l'idée d'électriser de l'eau placée dans un vase de verre, prit le vase à la main, et fit plonger dans le liquide une pointe métallique communiquant avec les conducteurs d'une machine électrique. En approchant alors l'autre main de la tige, il éprouva une commotion incomparablement plus forte qu'il ne l'avait prévu d'après la puissance de la machine. Muschenbroeck et plusieurs autres physiciens répétèrent l'expérience; en la communiquant au monde savant, ils en exagérèrent considérablement les effets: on ne la reproduisit donc d'abord qu'avec une certaine crainte, mais elle devint bientôt familière à tous ceux qui s'occupaient des progrès de l'électricité. Ce n'est que plus tard qu'Æpinus en donna la théorie. — Il est facile de voir que, dans cette expérience, le collecteur était représenté par la tige et par le liquide, la lame isolante par le verre, et le plateau condensateur par la main qui tenait le vase.

456. **Vérification, avec la bouteille de Leyde, des principes généraux des condensateurs.** — Toute la théorie du condensateur à plateaux est applicable à la bouteille de Leyde, comme on peut le vérifier en comparant les figures 515 et 519, où les parties correspondantes sont désignées par les mêmes lettres. Nous nous contenterons donc de montrer comment on peut vérifier, sur la bouteille de Leyde, les principaux résultats de la théorie des condensateurs.

457. Il n'y a d'électricité libre que sur l'armature A qu'on a mise en communication avec la machine (450) ; c'est ce qu'on peut démontrer en faisant communiquer avec un électroscope chacune des armatures d'une

Fig. 321.

bouteille isolée (*fig.* 321) ; l'électroscope a' est le seul qui s'écarte de sa tige.

458. On peut exécuter sur cette bouteille isolée la *décharge successive* (452), en touchant tour à tour l'une et l'autre armature, ce qui fait, à chaque contact, diverger le pendule de l'armature opposée, comme nous l'avons montré sur le condensateur à plateaux. — Enfin cette décharge peut s'effectuer d'elle-même à l'aide d'une disposition due à Franklin. L'armature extérieure communique avec une tige métallique A (*fig.* 322), et, à égale distance entre cette tige et le bouton C de l'armature inté-

Fig. 322. — Araignée de Franklin.

Fig. 323. — Carillon.

rieure, est placé un petit pendule B suspendu à un fil de soie. Ce pendule, successivement attiré et repoussé par l'une et l'autre armature, oscille de l'une à l'autre, et décharge la bouteille par une série de petites

étincelles. Franklin prenait pour pendule une petite balle de sureau, garnie de brins de soie, de manière à figurer les pattes d'une araignée sautant d'une boule à l'autre : de là le nom d'*araignée de Franklin*. — En plaçant un timbre sur chacune des tiges (*fig.* 323) et prenant pour pendule une petite balle métallique, on obtient un *carillon* continu, jusqu'à ce que la bouteille soit déchargée d'une manière à peu près complète.

459. La *décharge instantanée* (453) s'effectue encore en faisant communiquer par un excitateur les deux armatures (*fig.* 324); elle ne peut

Fig. 324.

non plus être jamais complète après une seule décharge : il y a toujours un *résidu*, et, en rétablissant la communication, on peut obtenir une nouvelle décharge, à cinq ou six reprises différentes.

460. **Dans un condensateur, c'est surtout sur le corps isolant que résident les fluides développés.** — Ce principe peut être démontré, soit avec le condensateur à plateau, soit avec une bouteille de Leyde à armatures mobiles.

Si l'on éloigne les plateaux métalliques de la lame de verre (*fig.* 314), et qu'on touche alors avec la main successivement les deux plateaux A et B, on voit les deux pendules retomber. Cependant, si l'on applique de nouveau les plateaux sur la lame de verre, on tire encore du système une très-vive étincelle. C'est donc sur la lame de verre que résident surtout les fluides développés.

Le même principe s'établit avec la *bouteille à armatures mobiles*, c'est-à-dire avec une bouteille de Leyde M (*fig.* 325), dont l'armature intérieure A et l'armature extérieure B peuvent se séparer du verre intermédiaire C. — Chargeons cette bouteille comme d'ordinaire, et plaçons-la

sur un plateau isolant; puis, enlevons avec la main l'armature intérieure, ce qui conduira son électricité dans le sol; retirons ensuite le vase de verre C, et mettons l'armature extérieure B en communication avec le sol. Si nous recomposons alors la bouteille, nous pourrons obtenir avec

Fig. 326.

l'excitateur une décharge très-forte. Les charges électriques étaient donc restées adhérentes au verre. — Nous avons fait remarquer (433) que cette adhérence contribue à rendre incomplète la décharge instantanée des condensateurs.

461. **Figures de Lichtenberg.** — On rend manifeste l'adhérence des fluides électriques pour les corps mauvais conducteurs, par l'expérience suivante, qui est due à Lichtenberg. — Une bouteille de Leyde étant chargée, on appuie l'armature intérieure, qui contient du fluide positif libre, sur un gâteau de résine comme celui de l'électrophore, et on la fait glisser de manière à tracer une figure quelconque, un cercle par exemple; puis, après avoir placé la bouteille sur un isoloir, on la prend par la tige, ce qui met en liberté du fluide négatif sur l'armature extérieure, et l'on se sert de cette armature pour tracer, sur le même gâteau, une autre figure, par exemple deux diamètres. Il est facile de constater alors l'adhérence des fluides en chacun des points touchés. Si l'on projette, en effet, sur ce gâteau, avec un petit soufflet, un mélange de soufre et de minium pulvérisés, le frottement des grains de poudre les uns contre les autres développant dans le soufre de l'électricité négative, et dans le minium de l'électricité positive, on voit les deux systèmes de figures apparaître nettement séparés : l'un présente la couleur jaune du soufre; l'autre, la couleur rouge du minium. — Ces figures présentent d'ailleurs une différence d'aspect; les jaunes sont comme hérissées de filets divergents; tandis que les rouges sont formées d'une multitude de petits cercles arrondis (*).

(*) La pénétration des fluides dans l'épaisseur même du corps isolant d'un condensateur est rendue manifeste par des expériences de Faraday et de Matteucci.

Faraday a construit un condensateur (*fig.* 326 dont la couche isolante est formée de deux lames très-épaisses de blanc de baleine, C, D, appliquées l'une contre l'autre; chacune d'elles porte sur sa face externe une plaque métallique : l'une de ces plaques

462. **Batteries électriques.** — Les batteries électriques sont des réunions de grosses bouteilles de Leyde, ou *jarres*, dont on fait communiquer d'une part toutes les armatures intérieures, et d'autre part toutes

Fig. 327. — Batterie électrique.

les armatures extérieures. On les place ordinairement dans une caisse de bois CC (*fig.* 327); l'intérieur de cette caisse est garni d'une feuille d'é-

a est mise en communication avec une machine électrique, l'autre *b* avec le sol. Le système étant chargé, on rompt les communications avec la machine et avec le sol, et on tire une étincelle avec l'excitateur. Si l'on examine les plaques métalliques *a* et *b* immédiatement après la décharge, on les trouve complétement neutres : si l'on abandonne ensuite le système isolé à lui-même, on trouve sur les lames des charges de retour plus faibles, mais de même nature que les charges primitives. Si, après la décharge, on sépare C de D, on trouve de l'électricité positive de retour sur la plaque *a* et de l'électricité négative sur la plaque *b*. Ces quantités d'électricité de retour sont d'autant plus considérables qu'on a laissé l'appareil plus longtemps chargé, avant d'effectuer la première décharge.

Fig. 326.

Matteucci a substitué à ces lames une série de feuilles de mica superposées : l'appareil ayant été chargé, puis déchargé avec l'excitateur, on a enlevé les plaques métalliques, et on a trouvé que les lames de mica prises du côté de *a* étaient chargées d'électricité positive sur les deux faces, jusqu'à une certaine profondeur; les lames du côté *b* étaient chargées d'électricité négative. — L'expérience prouve d'ailleurs que l'électricité négative pénètre à une profondeur plus grande que l'électricité positive.

tain, sur laquelle reposent toutes les armatures extérieures, et qui communique avec la poignée A. Les boutons de toutes les armatures intérieures sont réunis, par des tiges métalliques, au bouton central D. Pour charger la batterie, on met D en communication avec une machine électrique, et A en communication avec le sol, par une chaîne métallique. On place en E un électromètre de Henley (440), pour se rendre compte de la tension de l'électricité libre.

463. **Électroscope condensateur de Volta.** — L'électroscope condensateur de Volta (*fig.* 328) n'est autre que l'électroscope à feuilles d'or (439), dans lequel la boule supérieure est remplacée par un condensateur. La tige de l'électroscope porte un plateau métallique horizontal A, couvert à sa face *supérieure* d'une couche mince d'un vernis à la gomme-laque: sur celui-ci, on pose un second plateau B, dont la face *inférieure* est couverte d'une couche du même vernis. — Supposons qu'on ait à reconnaître la nature de l'électricité d'une source continue, dont la tension soit très-faible; les deux plateaux étant placés l'un sur l'autre, mettons cette source en communication avec la face supérieure du plateau B, et touchons en même temps le plateau inférieur avec la main. Il y aura accumulation de l'électricité de la source sur le plateau B, et d'électricité contraire sur le plateau A, jusqu'à ce que l'électricité libre ait acquis en B une tension égale à celle de la source; si l'on remarque maintenant combien est faible l'épaisseur des couches du vernis isolant, on voit que la force condensante doit être considérable. Si, après avoir supprimé les communications avec la source et avec le sol, on enlève le plateau B au moyen du manche de verre qu'il porte en son centre, l'électricité contraire accumulée sur le plateau A, n'étant plus maintenue contre la couche de vernis, se répandra sur la tige et sur les feuilles. On observera alors une divergence, et l'on pourra constater ensuite la nature de l'électricité obtenue, en approchant de l'instrument un corps chargé d'une électricité connue. — Cet électroscope est d'une très-grande sensibilité, et permet d'étudier des sources d'électricité qui n'auraient aucune action sensible sur l'électroscope ordinaire.

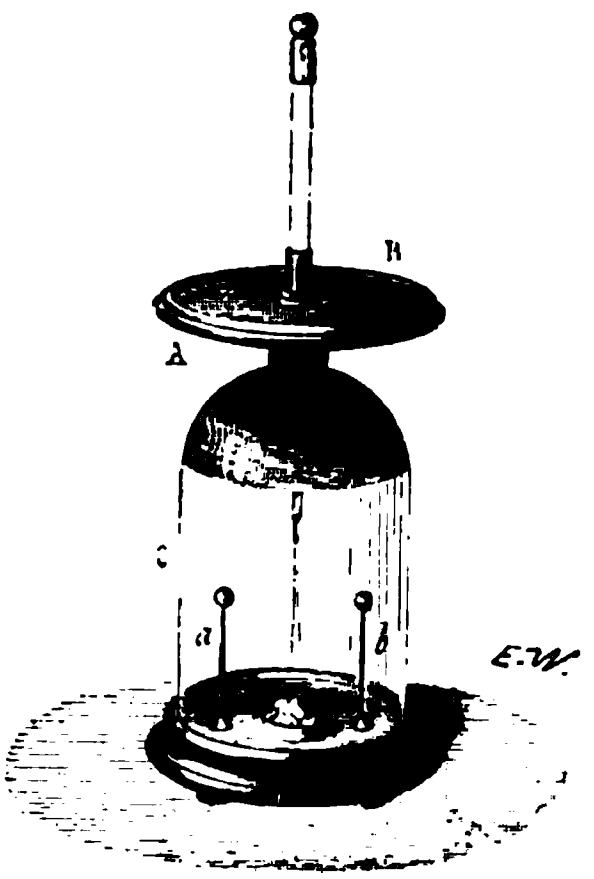


Fig. 328. — Électroscope condensateur de Volta.

VII. — EFFETS PRODUITS PAR LE PASSAGE DE L'ÉLECTRICITÉ.

464. La connexion intime qui existe entre tous les effets produits par le passage de l'électricité, connexion qui est frappante dans chacune des expériences suivantes et que nous signalons d'avance pour éviter les répétitions, en rend le classement assez artificiel : nous les diviserons en *effets mécaniques*, *calorifiques*, *lumineux* et *chimiques*; nous dirons ensuite quelques mots des *effets physiologiques* que produisent les décharges, en traversant le corps des animaux.

465. Effets mécaniques. — Le passage de l'électricité est accompagné d'un ébranlement moléculaire, qui paraît d'autant plus considérable que les corps sont plus mauvais conducteurs et que la tension de l'électricité est plus grande. — De là, des effets mécaniques qui se manifestent soit dans les corps solides, soit dans les liquides, soit dans les gaz.

1° Pour faire passer la décharge d'une batterie au travers des corps solides, on emploie ordinairement l'*excitateur universel* (*fig.* 329). Cet appareil se compose de deux branches métalliques A, A', isolées par des colonnes de

Fig. 329. — Excitateur universel.

verre C, C', et terminées par des boules D, D'. L'une des branches, A par exemple, étant mise en communication avec une des armatures d'une batterie, si l'on approche de A' un conducteur communiquant avec l'autre armature, il part une étincelle entre D et D', et la décharge traverse les corps qui ont été placés sur le support P. — Si, au moyen de cet appareil on fait passer la décharge d'une batterie au travers d'un morceau de bois

bien sec, on le voit voler en éclats : c'est un effet analogue à ceux que produit la foudre sur le tronc des arbres, ou sur les corps solides d'une structure semblable.

On observe des effets analogues dans les deux expériences connues sous les noms de *perce-carte* et de *perce-verre*. — On place une carte verticalement entre deux pointes métalliques A et D (*fig.* 350), supportées par deux montures métalliques qui sont isolées l'une de l'autre par une tige de verre C ; on fait passer la décharge d'une bouteille de Leyde entre les deux pointes, en faisant communiquer la chaine métallique E avec l'ar-

Fig. 330. — Perce-carte.

Fig. 331. — Perce-verre.

mature extérieure de la bouteille, et touchant la boule B avec le bouton de l'armature extérieure. La carte est percée d'un trou, qui est plus rapproché de la pointe négative que de la pointe positive. — Pour percer une lame de verre, on la place horizontalement en C (*fig.* 331), entre deux pointes métalliques verticales, et l'on opère comme précédemment. Le verre étant très-mauvais conducteur, la combinaison des fluides entre les deux pointes tend à se faire par l'air, en contournant la lame : aussi a-t-on soin d'entourer la pointe supérieure d'une goutte d'huile, ou mieux encore, d'introduire chaque pointe dans une petite masse de caoutchouc appliquée au centre de la lame (*).

2° Pour faire passer la décharge dans un liquide, on remplit d'eau un

(*) Quand la lame de verre est très-épaisse, au lieu d'opérer avec une bouteille de Leyde dont la tension est toujours considérable, il est préférable de faire communiquer la chaine métallique avec le sol, et la pointe A avec une machine électrique ; la rupture alors n'est pas brusque, mais se propage successivement dans l'épaisseur de la lame de verre.

tube de verre hermétiquement fermé (*fig.* 332), et contenant deux tiges métalliques disposées comme l'indique la figure. Les boules *a* et *b* sont à une petite distance l'une de l'autre, au milieu de l'eau ; la tige *ad* est mise en communication avec le sol, et l'on approche l'extrémité de la tige *bc* du conducteur D d'une machine électrique. On voit éclater deux

Fig. 332.

étincelles : l'une entre D et *c*, l'autre entre *a* et *b* ; l'ébranlement communiqué aux molécules du liquide est assez violent pour que le tube soit toujours brisé.

3° Le passage de la décharge dans un gaz est accompagné des mêmes phénomènes ; cependant l'élasticité du gaz lui permet de céder, jusqu'à un certain point, à l'espèce de refoulement produit par la décharge, comme le fait un ressort auquel on imprime un choc. L'appareil ci-contre, connu sous le nom de *mortier électrique* (*fig.* 333), est un petit mortier d'ivoire A, à l'ouverture duquel on place une bille d'ivoire B ; deux tiges métalliques D, E, permettent de faire passer la décharge d'une bouteille de Leyde dans l'air qui remplit la cavité C du mortier ; la bille B est lancée au moment de la décharge. — De même, dans l'appareil nommé *thermomètre de Kinnersley* (*fig.* 334), on fait passer la décharge entre les deux boules *a* et *b*, au milieu de l'air contenu dans le gros tube V ; l'eau, qui était au même niveau horizontal dans ce tube et dans le petit tube latéral K est vivement refoulé dans le tube K. Cet instrument ne peut d'ailleurs servir, en aucune façon, à mesurer l'élévation de température produite par la décharge, comme son nom semblerait l'indiquer.

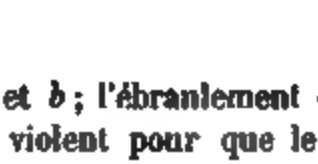


Fig. 333.—Mortier électrique.

Fig. 334. — Thermomètre de Kinnersley.

4° Enfin, toutes les fois qu'une étincelle un peu forte jaillit entre deux boules métalliques, une portion du métal est violemment arrachée, et se

porte d'une boule à l'autre, sous la forme d'une poudre fine, ou de petits globules présentant des traces de fusion. Ces phénomènes de transport ont été, de la part de M. Fusinieri, l'objet d'une étude toute spéciale. Il a observé par exemple, après avoir produit une série de décharges entre une boule d'argent positive et une boule de cuivre négative, que la boule d'argent portait une petite cavité tapissée d'oxyde de cuivre, et que sur la boule de cuivre étaient venus s'incruster de petits globules d'argent fondu.

466. **Effets calorifiques.** — Lorsque la décharge traverse un corps conducteur, un métal par exemple, on n'observe plus les mêmes effets mécaniques ; mais si le corps a une faible section, il se produit un dégagement de chaleur considérable.

On place, entre les branches de l'excitateur universel, un fil de platine très-fin ; au moment où l'on fait passer la décharge d'une batterie, le fil est fondu ou même volatilisé. — Si l'on substitue à ce fil métallique un fil de soie simplement *doré* à sa surface, la décharge laisse le fil de soie intact, et passe tout entière par la couche mince d'or, qu'elle projette en poussière noirâtre sur la feuille de carton qu'on a placée derrière (*fig.* 335).

Fig. 335.

En faisant en sorte que cette poussière métallique passe au travers d'une découpure pratiquée dans un corps mauvais conducteur, on obtient, sur les corps placés de l'autre côté, une image métallique de la découpure Pour réaliser ces conditions, on pratique dans un carton mince B (*fig.* 336), des découpures figurant grossièrement le portrait de Franklin, et l'on applique sur ce carton une feuille d'or qu'on maintient en rabattant sur elle les feuilles de carton A et C ; les petites lames F et F' sont en étain et servent de conducteurs. On place alors le carton B sur un ruban de soie blanche et l'on presse le tout entre deux plaques de bois P, afin de bien assurer les contacts. On fait passer la décharge d'une batterie entre les lames F et F' :

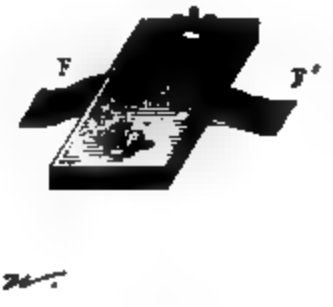


Fig. 336. — Expérience du portrait de Franklin.

de la machine, quand elle fonctionne très-bien, une *lueur* tranquille, et sans production d'aucun bruit. En même temps, on constate l'existence

Fig. 342.

d'un courant d'air, provenant des points où apparaît la lueur. — Ce phénomène paraît se produire d'autant plus facilement que la tension est plus considérable : ainsi, quand une sphère placée sur la machine produit une aigrette, il suffit ordinairement d'imprimer au plateau un mouvement de rotation plus rapide, pour voir cette aigrette remplacée par une lueur continue.

471. **Décharge dans les gaz très-raréfiés.** — Pour étudier les décharges électriques dans les gaz raréfiés, on emploie un appareil connu sous le nom d'*œuf électrique* (*fig.* 343) ; c'est un vase de verre ellipsoïdal, mastiqué dans des montures métalliques ; chacune de ces montures porte une tige terminée par une boule. — Un canal, pratiqué dans la monture inférieure et muni d'un robinet, permet de raréfier le gaz que contient l'appareil.

L'œuf contenant de l'air sous une pression de 5 à 6 centimètres de mercure, faisons communiquer la monture inférieure avec le sol et approchons la monture supérieure d'une machine : chaque décharge fait alors apparaître, entre les deux boules, des bandes lumineuses pourprées (*fig.* 343) ; la boule positive est environnée de rayons divergents ; la

Fig. 343.

boule négative est entourée, ainsi que sa tige, d'une lumière violacée. — Si l'on diminue la pression de l'air, on voit les bandes devenir successivement moins distantes ; quand la pression n'est plus que de quelques millimètres, elles se confondent en une gerbe lumineuse ovoïde, qui réunit les deux boules (*).

472. Enfin, on peut faire passer la décharge dans la chambre barométrique, au moyen de la disposition représentée par la figure 344. — Un tube de verre, formé de deux branches dont la longueur est de 85 à 90 centimètres, a été rempli de mercure : les deux branches ont été ensuite placées chacune dans un vase contenant du mercure, de manière à former deux baromètres à cuvette, réunis par leurs chambres barométriques. Dans l'une des cuvettes, plonge un fil métallique qui communique avec le sol ; dans l'autre, un fil métallique terminé par une petite boule. — Lorsqu'on approche cette boule du conducteur de la machine, on voit l'espace vide s'éclairer d'une lueur verdâtre. — Cette lueur est plus vive encore lorsqu'on opère avec une bouteille de Leyde, ou avec une batterie électrique (**).

Fig. 344.

473. **Tubes et carreaux étincelants.** — En terminant cette étude des phénomènes lumineux, nous dirons un mot de quelques appareils dont on fait usage dans les cours, pour produire, avec un grand nombre d'étincelles jaillissant à la fois, des dessins ou des figures diverses.

Fig. 345. — Tube étincelant.

Le *tube étincelant* (*fig.* 345) est un tube de verre, sur la surface intérieure duquel on a collé de petits losanges de clinquant, dont les pointes sont en regard les unes des autres et dont l'ensemble forme une spirale :

(*) On trouvera plus loin quelques autres phénomènes lumineux analogues, que l'on produit avec les décharges des appareils d'induction.

(**) Les expériences de M. Gassiot et quelques autres semblent indiquer que l'électricité ne peut pas traverser un vide absolu. Dans l'expérience que l'on vient de voir, la chambre barométrique peut être considérée comme à peu près purgée d'air, si l'appareil a été bien construit, mais elle contient toujours des vapeurs de mercure (301) c'est à leur présence que doit être attribuée la couleur de l'étincelle ; les expériences de Davy ont montré d'ailleurs que la lueur verte prend un éclat extrêmement vif quand on chauffe le mercure jusqu'à l'ébullition.

les deux losanges extrêmes communiquent avec les montures métalliques A, B. — Si l'on fait communiquer l'une des montures avec le sol, et qu'on approche l'autre du conducteur de la machine, on voit, à chaque décharge, le tube éclairé, dans toute sa longueur, par des étincelles qui jaillissent simultanément dans tous les intervalles compris entre deux losanges consécutifs.

Le *carreau étincelant* est un carreau de verre, qu'on a d'abord couvert, sur l'une de ses faces, d'un vernis à la gomme-laque ; on a ensuite appliqué sur le vernis une petite bande d'étain, qui forme un grand nombre de zigzags, et dont les extrémités viennent aboutir à deux côtés opposés de la face vernie. Cela fait, on a enlevé le métal en divers points, de manière à déterminer dans la bande des solutions de continuité, dont l'ensemble constitue un dessin plus ou moins compliqué. — Lorsqu'on met en communication avec le sol l'une des extrémités de la bande, et qu'on fait jaillir une étincelle d'une machine électrique à l'autre extrémité, on voit se produire à la fois, dans toutes les solutions de continuité, des étincelles qui font apparaître le dessin en points lumineux.

474. **Effets chimiques.** — L'étincelle électrique peut produire des effets chimiques. — Lorsqu'elle traverse, par exemple, un mélange d'hydrogène et d'oxygène, elle détermine la combinaison de ces deux gaz, qui forment de la vapeur d'eau. — Le *pistolet de Volta* (*fig.* 346) est une sorte de flacon métallique A, dont la paroi latérale est traversée par une tige métallique ED, mastiquée dans un tube de verre qui l'isole, et terminée à chacune de ses extrémités par une boule. On introduit dans le vase le mélange d'hydrogène et d'oxygène, et on le ferme avec un bouchon de liége B. Prenant alors le vase à la main, on approche la boule D du conducteur d'une machine : il part une étincelle entre la machine et la boule D, et une autre étincelle entre la boule E et la paroi du flacon : il y a combinaison des deux gaz : la force élastique acquise par la vapeur, sous la haute température qui se produit, lance le bouchon dans l'air, avec explosion.

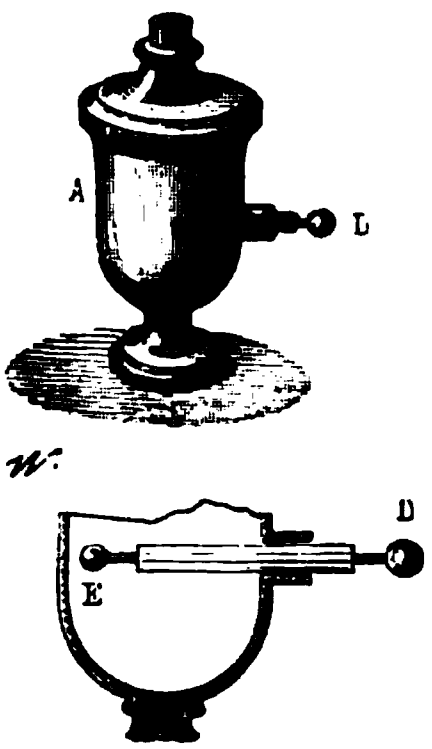


Fig. 346. — Pistolet de Volta.

Dans certains cas, une seule étincelle ne suffit pas pour déterminer la combinaison de deux gaz mélangés, et il en faut faire passer un grand nombre pour constater un résultat. — C'est ainsi, par exemple, qu'il faut faire passer une série d'étincelles dans un mélange d'azote et d'oxygène, en présence d'une solution alcaline, pour produire des quantités d'acide azotique appréciables.

475. L'étincelle peut, au contraire, décomposer certains corps en leurs éléments ; et, dans ce cas, il faut toujours faire intervenir une série d'é-

tincelles. — Ainsi l'ammoniaque se décompose, sous l'influence d'un grand nombre d'étincelles, en azote et en hydrogène : l'acide carbonique, en oxygène et en oxyde de carbone : les huiles donnent en général de l'oxygène, de l'hydrogène et des carbures d'hydrogène. — Lorsqu'on fait passer les décharges d'une machine puissante à travers une bande de papier, humectée d'une solution saline et colorée avec du sirop de violettes, on voit le papier rougir du côté positif et verdir du côté opposé. Le sel a donc été décomposé : son acide s'est porté d'un côté, et sa base de l'autre.

476. **Effets physiologiques.** — Lorsqu'on approche la main d'une machine chargée d'électricité, on éprouve, au moment où jaillit l'étincelle, une commotion dans les articulations de la main et du bras, et cette commotion est accompagnée le plus souvent d'une contraction involontaire. — Ces phénomènes, que nous nous contenterons de signaler, sans tenter d'en donner aucune explication, s'observent toutes les fois que des fluides contraires se combinent à travers les organes des animaux. Dans le cas actuel, l'électricité de la machine se combine avec l'électricité contraire du corps humain, qu'elle avait attirée dans les points les plus voisins. En même temps, l'électricité de même nom, qui avait été refoulée dans le sol, rentre brusquement par les membres inférieurs, et produit une autre commotion dans les pieds et dans les jarrets. — La commotion se fait sentir d'autant plus profondément, que la tension était plus grande. Si la tension est assez considérable pour que l'étincelle jaillisse à 3 ou 4 décimètres de distance, on ressent une véritable douleur, jusque dans la poitrine, et l'expérience peut devenir dangereuse : ces décharges sont foudroyantes pour les animaux de petite taille (*).

La commotion produite par une bouteille de Leyde, lorsque, tenant à la main l'armature extérieure, on approche l'autre main de l'armature intérieure, est beaucoup plus violente que celle des machines : elle présente d'ailleurs des caractères semblables. — On peut la faire ressentir simultanément a un grand nombre de personnes, placées à la suite l'une de l'autre et se tenant par la main de manière à former une chaîne continue ; la première prend à la main la panse de la bouteille, et la dernière vient toucher du doigt le bouton de l'armature intérieure : tous les

(*) Si, pendant qu'on fait fonctionner une machine électrique, un expérimentateur placé sur un tabouret à pieds de verre vient à approcher la main des conducteurs, il ressent encore une commotion dans le poignet et dans le bras, au moment où part l'étincelle. S'il laisse ensuite sa main en contact avec le conducteur, il n'éprouve, pendant que son corps se charge d'électricité, qu'une sorte de frisson presque imperceptible, analogue à celui que produirait un souffle léger, sur les mains et sur la face : en même temps, ses cheveux se hérissent et s'écartent en divergeant de sa tête, comme le pendule de l'électromètre de Henley par rapport à sa tige (440). La divergence augmente si un autre expérimentateur, communiquant avec le sol, approche sa main de leur extrémité : c'est là une simple action d'influence, sur laquelle il n'est pas nécessaire d'insister. — Enfin on peut tirer des étincelles du corps de l'expérimentateur qui est isolé et qui communique avec la machine, comme de la machine elle-même; elles ne produisent sur lui qu'une sensation passagère, semblable à celle d'une légère piqûre.

individus ressentent à la fois la commotion, mais ceux qui sont voisins des extrémités sont toujours les plus éprouvés. Cette expérience fut faite par l'abbé Nollet devant le roi Louis XV, sur une réunion de trois cents gardes : on la répète souvent dans nos cours, en y faisant participer les auditeurs.

Les décharges des *batteries* sont assez redoutables pour qu'on doive éviter avec soin de les faire passer par le corps humain : les expériences dans lesquelles on a pu, en multipliant le nombre des jarres et en employant des machines puissantes, obtenir des décharges qui tuaient instantanément des animaux de grande taille, prouvent qu'on ne saurait prendre trop de précautions quand on opère dans des circonstances semblables (*).

(*) Voir à la fin du volume, livre VI, *Météorologie*, ce qui concerne l'électricité atmosphérique.

CHAPITRE II

MAGNÉTISME

I. — PRINCIPES GÉNÉRAUX DU MAGNÉTISME.

477. Aimants naturels et aimants artificiels ; leur action sur les substances magnétiques. — L'*aimant naturel* ou la *pierre d'aimant* (μάγνης) est un oxyde de fer (*) qu'on trouve dans le sein de la terre, en masses parfois assez considérables : il possède la propriété remarquable d'attirer le fer et quelques autres métaux, comme le nickel, le cobalt, le chrome. Cette propriété, connue déjà dans l'antiquité, a reçu le nom de *magnétisme*, et on nomme *substances magnétiques* celles qui sont attirables par l'aimant.

Lorsqu'on exerce sur un barreau d'acier trempé (**) des frictions avec un aimant, ou lorsqu'on le soumet à quelques autres traitements qui seront étudiés dans la suite, il acquiert et conserve la propriété d'attirer le fer ; il devient un *aimant artificiel*. Au contraire, le fer, lorsqu'il est parfaitement pur (*fer doux*), ne peut acquérir une aimantation permanente. — Les aimants artificiels, plus puissants en général que les aimants naturels, et plus commodes, puisqu'on peut disposer à volonté de leurs formes et de leurs dimensions, sont d'un emploi beaucoup plus fréquent.

C'est spécialement aux aimants artificiels que nous aurons recours dans

(*) C'est la combinaison qu'on désigne, en chimie, sous le nom d'*oxyde magnétique* et qu'on représente par la formule Fe^3O^4.

(**) L'acier est une combinaison de fer et d'une petite quantité de carbone. — L'opération de la *trempe* consiste à refroidir brusquement l'acier, après l'avoir chauffé à une haute température, ce qu'on effectue en général par une immersion rapide dans l'eau froide. Ordinairement, après avoir trempé les barreaux d'acier qui doivent servir à la construction des aimants, on les *recuit*, c'est-à-dire qu'on les réchauffe à une température plus ou moins élevée, pour les laisser ensuite refroidir lentement. Cette dernière opération a pour effet de ne laisser à l'acier qu'un degré déterminé de dureté, qui dépend de la température à laquelle on l'a recuit.

l'étude du magnétisme : tout ce que nous dirons de leurs propriétés est d'ailleurs également applicable aux aimants naturels.

478. **Pôles des aimants ; ligne neutre.** — Lorsqu'on roule un barreau aimanté dans de la limaille de fer, on voit s'attacher, autour de ses deux extrémités (*fig.* 347), des filaments formés par des grains de limaille, juxtaposés et serrés en houppes les uns contre les autres. Ils deviennent d'autant plus rares qu'on s'approche davantage de la ligne médiane MN, où ils disparaissent complétement. Les deux points P et P', vers lesquels semblent converger les filaments formés par la limaille, et qui paraissent agir comme deux centres d'attraction, ont reçu le nom de *pôles ;* la ligne médiane MN, celui de *ligne neutre* (*).

Fig. 347.

Cette inégalité d'action des diverses régions d'un barreau sur la limaille apparaît mieux encore, quand on place un barreau aimanté sous une feuille de carton horizontale, et que l'on fait tomber, au moyen d'un tamis, une pluie de limaille de fer sur ce carton. On voit alors les grains

M

Fig. 348.

se grouper de manière à dessiner nettement le contour du barreau (*fig.* 348), surtout si l'on a soin d'imprimer au carton de petites secousses, en le frappant légèrement avec la main pour permettre à la limaille de se

(*) Il arrive parfois que les barreaux mal aimantés ou les aimants naturels, au lieu d'offrir seulement deux pôles et une ligne neutre, présentent en outre, dans leur longueur, plusieurs centres d'attraction, qu'on appelle alors *points conséquents ;* ces points sont séparés les uns des autres par des régions inactives. C'est là une irrégularité tout à fait exceptionnelle, sur laquelle nous reviendrons plus loin.

déplacer un peu à sa surface. Autour des pôles P et P′, elle forme de longs filaments, très-serrés les uns contre les autres, et dont les directions convergent vers ces points ; au-dessus de la partie médiane du barreau, se trouve un peu de limaille qui est demeurée là où elle était tombée, sans paraître subir d'attraction ; enfin, autour de cette région, de longs filaments viennent, en se courbant comme des espèces d'arcades, réunir les points symétriques des deux moitiés du barreau.

479. **Action de la terre sur les aimants. — Distinction des deux pôles.** — Un barreau aimanté horizontal, placé dans une petite chape de papier C (*fig.* 349), suspendue par un fil sans torsion, prend une direction fixe, à laquelle il revient toujours, après quelques oscillations, quand on l'en écarte d'un côté ou de l'autre. Cette direction est *à peu près* celle du nord au sud.

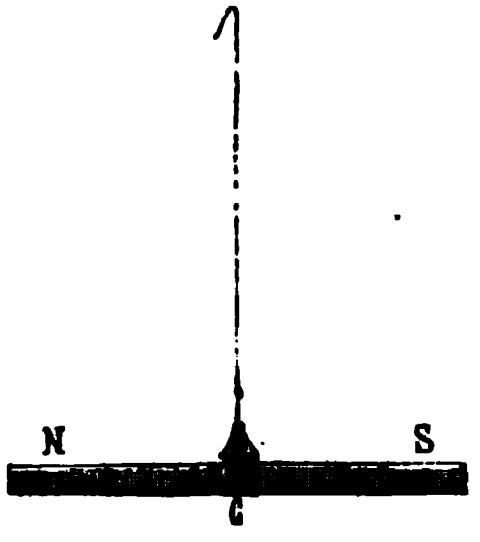


Fig. 349.

Si maintenant on marque le pôle N qui s'est dirigé vers le nord, et qu'on retourne le barreau, de manière à diriger ce pôle vers le sud et réciproquement, on voit le barreau faire une demi-révolution dès qu'on l'abondonne, et revenir, après quelques oscillations, à sa position primitive.

De là on peut donc conclure :

1° *Que la terre exerce sur un aimant une action qui lui donne, en chaque point du globe, une orientation déterminée ;*

2° *Que les deux pôles d'un aimant ne sont pas identiques.*

Nous donnerons provisoirement aux deux pôles les noms de *pôle nord* et de *pôle sud.*

480. **Méridien magnétique. — Déclinaison.** — On appelle *méridien magnétique* d'un lieu le plan vertical qui passe par la ligne des pôles d'un aimant mobile dans un plan horizontal autour de son milieu, lorsque cet aimant est en équilibre dans ce lieu.

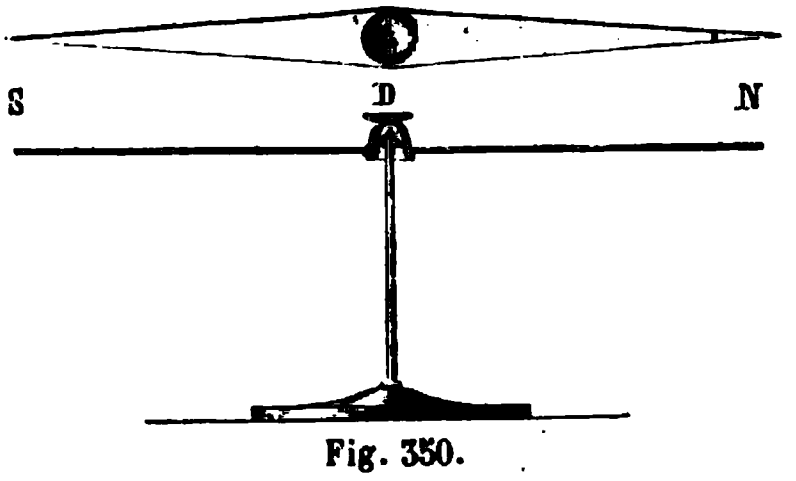


Fig. 350.

Dans la plupart des points de la terre, ce plan ne coïncide pas exactement avec celui du méridien géographique ; il forme avec lui un angle plus ou moins grand, qu'on nomme la *déclinaison* du lieu.

On emploie fréquemment, au lieu de barreaux prismatiques, comme celui de la figure 349, des aiguilles (*fig.* 350), taillées en forme de losange très-allongé, et portées par un pivot métallique vertical, sur lequel

elles s'appuient par une petite chape d'agate fixée en leur milieu D. — Pour déterminer approximativement la position du méridien magnétique, on peut toujours supposer que la ligne des pôles coïncide avec la grande diagonale du losange (*).

481. **Action réciproque des pôles de deux aimants.** — Supposons que, par une expérience préliminaire, on ait déterminé le pôle nord N et le pôle sud S d'une aiguille, et de même les pôles N′ et S′ d'un barreau : si, prenant à la main le barreau, on l'approche de l'aiguille en présentant

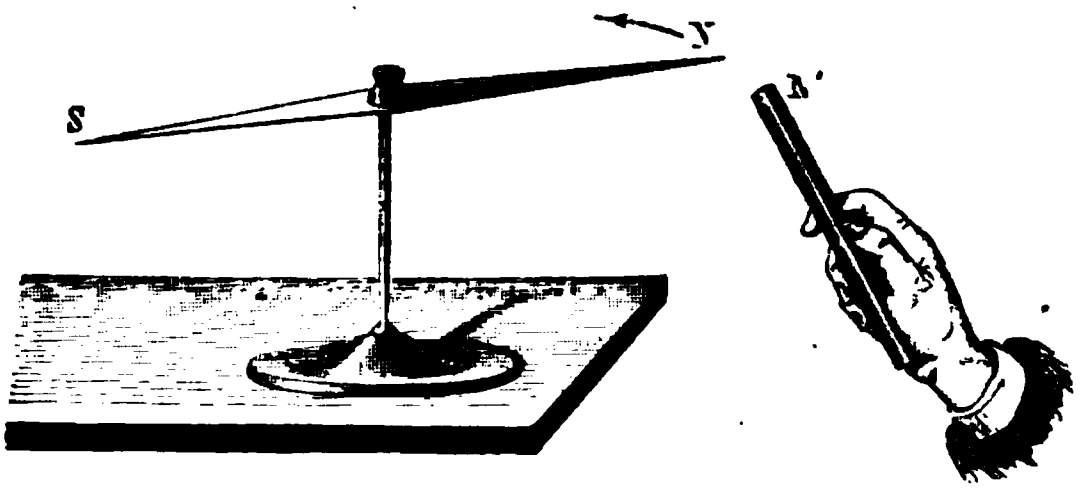


Fig. 351.

le pôle N′ au pôle N (*fig.* 551), on observe une répulsion; de même, le pôle S′ repousse le pôle S. — Donc, *deux pôles de même nom se repoussent.*

Au contraire, si l'on présente le pôle N′ au pôle S, on observe une attraction. — Donc, *deux pôles de noms contraires s'attirent.*

482. **Hypothèse de l'aimant terrestre.** — D'après ce qui précède, nous pouvons, dès maintenant, nous faire une idée de l'action exercée par la terre sur les aimants.

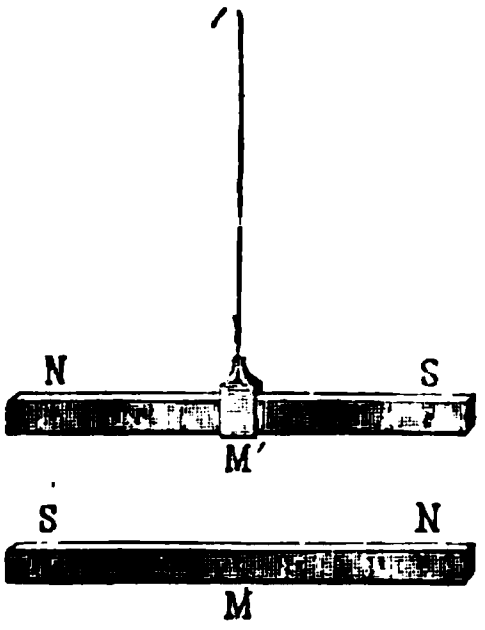


Fig. 352.

Supposons, en effet, que l'on suspende horizontalement un barreau aimanté M′ (*fig.* 352), et qu'on place au-dessous de lui, dans une position horizontale et à une petite distance, un autre barreau aimanté M, suffisamment énergique et orienté d'une manière quelconque. L'équilibre ne peut exister pour le barreau M′ que s'il vient se placer parallèlement à M, les pôles de noms contraires étant en regard, comme l'indique la figure : s'il est écarté de cette position, on l'y voit revenir en effectuant, de part et d'autre, des oscillations dont l'amplitude va toujours en décroissant et finit par devenir nulle. — Or

(*) Les aiguilles ayant conservé, après le recuit (*Note* de la page 389), une teinte d'un bleu foncé, qui est due à une couche mince d'oxyde formé à leur surface, on est con

c'est précisément ainsi que se comporte, à la surface de la terre, un aimant qui peut se mouvoir dans un plan horizontal, autour de son milieu. L'action de la terre sur cet aimant est donc comparable, non pas à celle d'une masse de fer, puisqu'elle ne s'exerce pas indifféremment sur les deux pôles, mais à celle d'un aimant puissant, orienté à peu près du nord au sud.

La distance de cet aimant à la surface du globe doit être regardée comme très-grande : en effet, la direction d'une aiguille aimantée ne change pas sensiblement lorsque, l'ayant laissée se mettre en équilibre dans un lieu, on la transporte à une petite distance, à quelques kilomètres par exemple ; or ce résultat ne peut se concevoir qu'en considérant les centres d'action de la terre comme placés très-loin de sa surface. Enfin, comme il en est de même en quelque région du globe qu'on opère, les centres d'action ne peuvent être placés qu'à une très-grande distance de *tous les points* de la surface de la terre. — Nous devrons donc supposer que l'aimant hypothétique, dont l'action peut représenter l'action magnétique de la terre, est situé au voisinage de son centre.

Nous le désignerons, à l'avenir, par l'expression abrégée d'*aimant terrestre*. Quant à la direction précise de la ligne qui joindrait les deux pôles de cet aimant, nous la fixerons plus loin d'une manière plus rigoureuse.

483. **Origine des dénominations de pôle austral et pôle boréal, données aux extrémités des aimants.** — L'*aimant terrestre* devant être regardé comme dirigé à peu près du nord au sud, l'un de ses pôles sera placé dans l'hémisphère boréal, et pourra prendre le nom de *pôle boréal* ; le pôle contraire, situé dans l'hémisphère austral, sera le *pôle austral*. — Or, si l'on considère maintenant un barreau aimanté, en équilibre à la surface du globe, et qu'on veuille donner à ses deux pôles des dénominations semblables, on devra regarder les pôles du barreau comme étant placés en sens inverse de ceux de l'aimant terrestre (482). On devra donc nommer *pôle austral* celui qui se dirige vers le nord, et *pôle boréal* celui qui se dirige vers le sud.

Ce système de dénominations, qui désigne chacun des pôles d'un aimant, non pas par le nom du point de l'espace vers lequel il se dirige, mais par celui du pôle de l'aimant terrestre dont il est l'analogue, est adopté en France à peu près exclusivement, au moins dans le langage scientifique (*).

484. **Hypothèse des deux fluides magnétiques.** — L'action réciproque des pôles de deux aimants, action répulsive ou attractive selon

venu de n'enlever cet oxyde que dans la moitié de l'aiguille qui se dirige vers le sud. Lorsqu'elles sortent des mains du constructeur, le pôle bleu est donc toujours le pôle nord.

(*) On emploie dans la marine les expressions d'*extrémité nord* et *extrémité sud*, qui ne donnent lieu à aucune ambiguïté

que ces pôles sont de noms contraires ou de même nom, a conduit à admettre, comme pour l'explication des attractions et répulsions électriques, l'existence de deux fluides impondérables qu'on a nommés *fluides magnétiques*.

Lorsqu'un barreau est aimanté, l'action de l'un de ces fluides se manifeste à l'une de ses extrémités, et tout se passe comme si cette action émanait du pôle correspondant : en même temps, l'action de l'autre fluide se manifeste à l'extrémité opposée, comme si elle émanait de l'autre pôle. Dès lors, pour mettre l'hypothèse d'accord avec les résultats de l'expérience, il suffit d'admettre que chacun des fluides magnétiques exerce une répulsion sur le fluide de même nom, et une attraction sur le fluide de nom contraire.

Quand un barreau n'est pas aimanté, on admet qu'il contient les deux fluides, distribués de telle façon que leurs actions contraires sur une molécule de fluide extérieur quelconque se détruisent, et on dit que le barreau est à l'*état neutre*. — On dit, d'ailleurs, comme pour l'électricité, que les deux fluides contraires sont en *quantités égales*, lorsque, par leur réunion, ils peuvent amener à l'état neutre le corps qui les contient.

485. **Aimantation par influence.** — Le développement du magnétisme par influence peut être démontré au moyen de l'expérience suivante :

On prend un barreau de fer doux, et, après avoir constaté qu'il n'exerce aucune attraction sur la limaille de fer, on approche de l'une de ces extrémités l'un des pôles A d'un aimant (*fig.* 353). Dès que la distance est suffisamment petite, on voit le fer doux *ab* acquérir lui-même la propriété de fixer la limaille de fer autour de ces deux extrémités. — Au contraire, dès qu'on éloigne l'aimant AB, on voit le barreau de fer doux perdre toute trace d'aimantation.

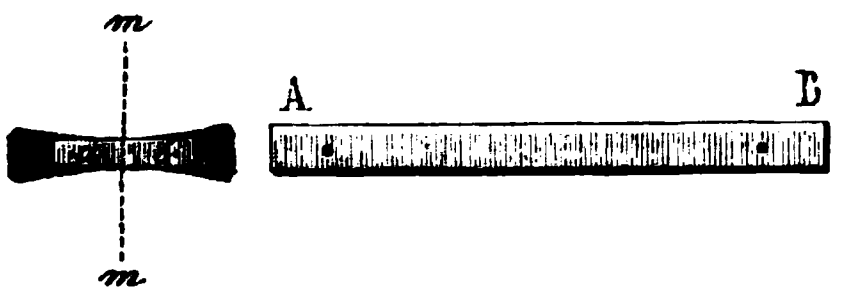


Fig. 353.

Si, pendant que l'aimant AB est en présence du barreau de fer doux, on approche successivement de chacune des extrémités de celui-ci l'un des pôles d'une aiguille aimantée, portée sur un pivot, on voit qu'elles exercent des actions contraires sur ce pôle. Si, comme le suppose la figure, c'est le pôle austral A de l'aimant qui est présenté au fer doux, il se produit un pôle boréal vers l'extrémité *b* la plus rapprochée de A, et un pôle austral vers l'extrémité *a* la plus éloignée. Enfin, dans le cas actuel, la ligne neutre *mm* est un peu plus voisine de *b* que de *a*. — Ces résultats s'expliquent facilement dans la théorie des deux fluides : il suffit, pour cela, d'admettre que le fer doux contient les deux fluides magnétiques également distribués en tous ces points, mais que ces fluides ont une adhérence assez faible pour les molécules matérielles. Au mo-

ment où l'on présente à un barreau de fer doux le pôle d'un aimant, le fluide dont l'action prédomine à ce pôle doit attirer dans le fer doux le fluide de nom contraire, et repousser le fluide de même nom : de là un changement dans la distribution des fluides du barreau influencé, changement qui tend à y produire le *même groupement* que dans un aimant véritable.

Il est facile de prévoir que les mêmes phénomènes doivent se produire sur un second barreau de fer doux, qu'on approchera du premier : puis sur un troisième, et ainsi de suite. Cependant l'énergie de l'aimantation va toujours en décroissant, à mesure qu'on s'éloigne de l'aimant influent AB.

486. **Attraction du fer doux par les aimants.** — C'est dans l'aimantation par influence qu'on peut trouver l'explication de l'attraction exercée par les aimants sur le fer doux. — En effet, dès que l'influence du pôle A (*fig.* 353) a déterminé dans le barreau *ab* la formation de deux pôles *a* et *b*, l'attraction réciproque des pôles A et *b* l'emporte sur la répulsion des pôles A et *a*, à cause de la différence des distances auxquelles ces actions s'exercent; la résultante de ces deux actions sollicite donc le barreau de fer vers le pôle A. — Comme cette force attractive augmente rapidement à mesure qu'on approche les deux corps l'un de l'autre, le fer doux se précipite bientôt vers l'aimant et y reste fixé.

C'est par une succession d'influences semblables qu'on peut suspendre au pôle d'un aimant une série de barreaux de fer doux, comme le montre la figure 354; mais, à mesure qu'ils s'éloignent de A, l'aimantation des barreaux successifs devient de plus en plus faibles, et les poids qu'ils peuvent supporter deviennent de plus en plus petits.

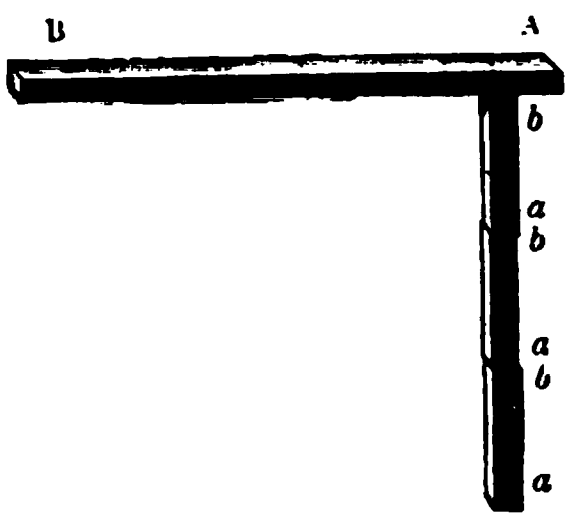


Fig. 354.

Enfin, il est facile de concevoir pourquoi la limaille de fer, en s'attachant autour des pôles d'un aimant, affecte la forme de filaments dont la direction converge vers ces pôles (*fig.* 347). Chaque grain de limaille devient un aimant, capable d'attirer à son tour d'autres grains; il se forme donc, sur chacun des points qui avoisinent les pôles du barreau, une file de particules de fer, qui va en s'allongeant jusqu'à ce que l'aimantation de la dernière particule soit trop faible pour en soutenir une de plus.

487. **Action des aimants sur l'acier. — Force coercitive.** — Lorsqu'on met en présence un aimant et un barreau d'acier trempé, non aimanté, on n'observe d'abord dans l'acier aucune aimantation, ni aucune attraction de la part de l'aimant. Cependant, si on laisse longtemps ces corps en présence, on voit se développer lentement dans l'acier une

aimantation croissante. Une fois l'aimantation développée, elle persiste, lors même qu'on éloigne l'aimant qui l'a produite.

Dans la théorie des fluides, on exprime ces divers résultats en disant que l'acier se distingue du fer doux par la difficulté que les deux fluides éprouvent à s'y mouvoir. Dès lors, quand on soumet à l'action du pôle d'un aimant un barreau d'acier à l'état naturel, le groupement capable de produire l'aimantation ne peut s'effectuer qu'avec lenteur; mais, en revanche, une fois que l'aimantation de l'acier est ainsi développée, la même cause empêche les fluides de se recombiner sous l'influence de leurs actions mutuelles, alors même qu'on enlève l'aimant influent. — Cette résistance qu'oppose l'acier aux mouvements des fluides a reçu le nom de *force coercitive*.

488. **Répartition des fluides magnétiques dans les corps aimantés. — Théorie de Coulomb.** — Lorsqu'on cherche à se rendre compte de la distribution des fluides magnétiques, soit dans un barreau de fer doux aimanté par influence, soit dans un barreau d'acier aimanté d'une manière durable, les analogies qui existent entre ces phénomènes et ceux du développement de l'électricité par influence portent d'abord à les interpréter d'une manière analogue; le fluide austral se transporterait en quantité prédominante vers l'une des extrémités du barreau; le fluide boréal, vers l'autre extrémité. Cette assimilation serait inexacte, ainsi que nous allons le démontrer.

1° Lorsqu'on met en présence d'un pôle magnétique A (*fig.* 355) une série de barreaux de fer doux, en contact les uns avec les autres, on observe deux pôles contraires aux deux extrémités de la série, et une ligne neutre au milieu : l'ensemble de ces barreaux juxtaposés se comporte donc comme un barreau unique. Cependant il n'y a pas transport des fluides, d'un barreau à un autre, vers les extrémités de la série; car si l'on enlève l'un *quelconque* de ces barreaux, il retombe à l'état neutre, ce qui montre qu'il contenait les deux fluides en égales quantités.

Fig. 355.

2° Prenons une aiguille d'acier aimantée AB (*fig.* 356), et plongeons-la dans la limaille de fer, de manière à constater que la limaille s'attache seulement aux deux extrémités et que le milieu N est une ligne neutre; approchons-la ensuite d'une aiguille aimantée mobile sur un pivot, afin de distinguer l'un de l'autre le pôle austral A et le pôle boréal B. Cela fait, brisons l'aiguille au point N (*fig.* 357); chacun des deux fragments attire alors la limaille de fer par ses deux extrémités, et l'on reconnaît que le fragment de gauche a un pôle austral en A, un pôle boréal en B', et une ligne neutre en son milieu; le fragment de droite a, de même, un

pôle austral en A′, un pôle boréal en B, et une ligne neutre en son milieu. — Brisons encore l'un de ces fragments en deux parties (*fig.* 358) :

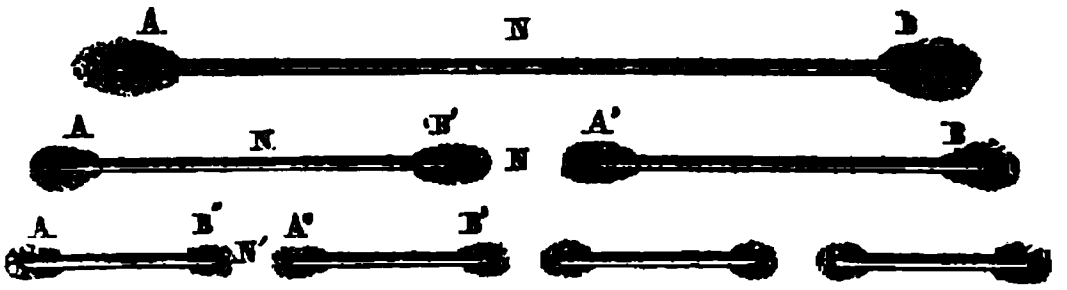


Fig. 356, 357, 358.

chacun des fragments partiels devient encore un aimant complet, dont les pôles sont distribués comme l'indique la figure. — Il en est toujours de même, quelque loin qu'on pousse la division des fragments.

Il est donc impossible d'admettre : 1° que dans une série de barreaux aimantés par influence, les fluides se soient transportés d'un barreau à un autre; 2° que dans un barreau d'acier aimanté, il y ait eu transport des fluides vers les extrémités.

489. En présence de ces résultats, Coulomb a été conduit à considérer les fluides comme pouvant se mouvoir seulement dans des espaces très-petits, qu'il a nommés *éléments magnétiques* : chacun de ces éléments contiendrait toujours les deux fluides en quantités égales, soit que le corps fût à l'état neutre, soit qu'il fût aimanté; mais il s'opérerait, par le fait de l'aimantation, une distribution particulière des fluides dans chacun d'eux. — Or si, dans un aimant, on considère une série d'éléments formant une rangée parallèle à la ligne des pôles (*fig.* 359), et si l'on admet qu'il y ait, dans chacun d'eux, accumulation de fluide austral vers l'une

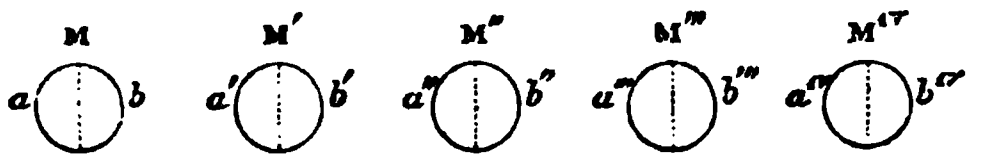


Fig. 359.

des extrémités, accumulation de fluide boréal vers l'autre, on peut démontrer que cette séparation des fluides ne peut être la même pour les éléments successifs de la série. Coulomb a montré, en outre, que la séparation doit être d'autant plus complète que l'on considère des éléments plus voisins du milieu de la série (*).

(*) Les raisonnements suivants permettent de s'en rendre compte :

Soit M (*fig.* 360) un élément isolé, dont les fluides ont été séparés par une influence quelconque, par exemple celle d'un pôle magnétique puissant. Lorsque cette influence aura été écartée, il y aura une recomposition partielle qui s'arrêtera quand l'attraction mutuelle des fluides *b* et *a* sera devenue égale à la limite de force coercitive.

Supposons maintenant deux éléments M et M′ (*fig.* 361), placés au voisinage l'un de l'autre, et soumis à l'action d'un pôle magnétique. Je dis que, dans chacun de ces éléments, il restera une plus grande quantité de fluides séparés, après qu'on aura écarté le pôle influent, que si cet élément était isolé. Considérons, en effet, les actions

Ce principe étant admis, on voit que la quantité a' de fluide austral séparé dans l'élément M′ (*fig.* 359) surpasse la quantité b de fluide boréal séparé dans l'élément contigu M ; de même la quantité a'' surpasse b' ; on conçoit donc, en définitive, que dans toute la moitié gauche de la série, le fluide austral prédomine en chaque point sur le fluide boréal et que tout se passe comme si cette moitié ne contenait que du fluide austral *libre*. — De même, tout se passe comme si la moitié droite de la série ne contenait que du fluide boréal *libre*.

490. Il résulte de cette théorie que chaque pôle d'un barreau aimanté doit être considéré simplement comme un point par lequel passe la résultante de toutes les actions concordantes d'une moitié de ce barreau. — Dès lors, l'apparition de nouveaux pôles dans les fragments d'un aimant brisé (488, 2°) devient facile à concevoir : en effet, après la rupture, un fragment quelconque se compose toujours d'un certain nombre d'éléments dans lesquels l'orientation des fluides est la même que dans le barreau primitif. On voit d'ailleurs que, par le fait de la rupture, il doit y avoir en chaque point recomposition partielle des fluides séparés, car un élément quelconque est alors soumis à l'influence d'un moins grand nombre d'autres éléments (*).

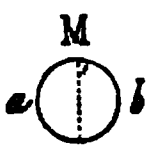


Fig. 360.

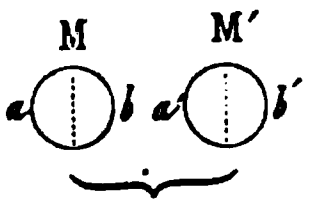


Fig. 361.

réciproques qui prennent naissance entre M et M′ ; elles se composent : 1° des actions répulsives qui s'exercent, entre a et a' d'une part, entre b et b' de l'autre ; mais ces action tendent, dans chaque élément, l'une à recomposer, l'autre à tenir séparés les fluides, et comme elles s'exercent entre des quantités de fluide, égales deux à deux, et à des distances égales, elles ne doivent avoir aucun effet ; 2° des actions attractives qui s'exercent, entre b et a' d'une part, entre a et b' de l'autre, la première tendant à séparer, la seconde à réunir les fluides ; mais comme la première s'exerce à une distance moindre, elle l'emporte sur la seconde, et leur différence s'ajoute à la force coercitive pour conserver une aimantation plus énergique. — Donc, en définitive, *la résultante des actions mutuelles de deux éléments voisins tend à maintenir la séparation des fluides plus complète, et cette action est d'autant plus énergique que les éléments sont plus voisins.*

Considérons enfin une série d'un nombre quelconque d'éléments également distants, cinq par exemple (*fig.* 359) : soit d la distance de deux éléments consécutifs. Supposons que les fluides soient d'abord également séparés dans tous les éléments de la série, et voyons ce qui doit résulter de leur influence mutuelle. — L'élément M subit l'influence de quatre éléments situés à des distances de lui qui sont représentées respectivement par d, $2d$, $3d$, $4d$. L'élément M′ subit encore l'influence de quatre éléments, mais ils sont situés à des distances de lui représentées par d, $2d$, $3d$, $4d$: donc cette influence doit surpasser celle qui s'exerce sur M, et les fluides doivent être maintenus plus complétement séparés en M′ qu'en M. — Un raisonnement semblable, appliqué aux autres éléments, conduira à conclure que, dans les éléments M′′′ et M, la séparation doit être la même, mais elle doit être moindre que dans M′ et M″ ; enfin, c'est dans l'élément du milieu M″ que la séparation sera maximum. — Ces conclusions sont évidemment générales.

(*) La production de *points conséquents* (note de la page 390) dans la longueur de la série peut s'expliquer en admettant que, de distance en distance, dans un même barreau aimanté, l'orientation des fluides séparés soit intervertie. Le barreau se com-

491. **Distribution du magnétisme libre dans un barreau aimanté.** — Coulomb a déterminé expérimentalement la distribution du magnétisme libre aux divers points d'un barreau aimanté, en se servant d'une balance de torsion analogue à celle qui a été décrite plus haut (*fig.* 285) : on mesurait les actions exercées par les diverses régions de ce barreau sur le pôle d'une aiguille suspendue au fil de la balance, dans le méridien magnétique, en tordant le fil de façon que ce pôle fût toujours amené presque au contact de la région soumise à l'expérience. — Il a trouvé ainsi que l'intensité de l'action magnétique, sensiblement nulle au milieu et très-petite encore dans les points voisins, acquiert ensuite des valeurs rapidement croissantes jusqu'aux extrémités.

En d'autres termes, si l'on représente les *quantités de magnétisme libre*, aux différents points, par des perpendiculaires élevées sur le barreau,

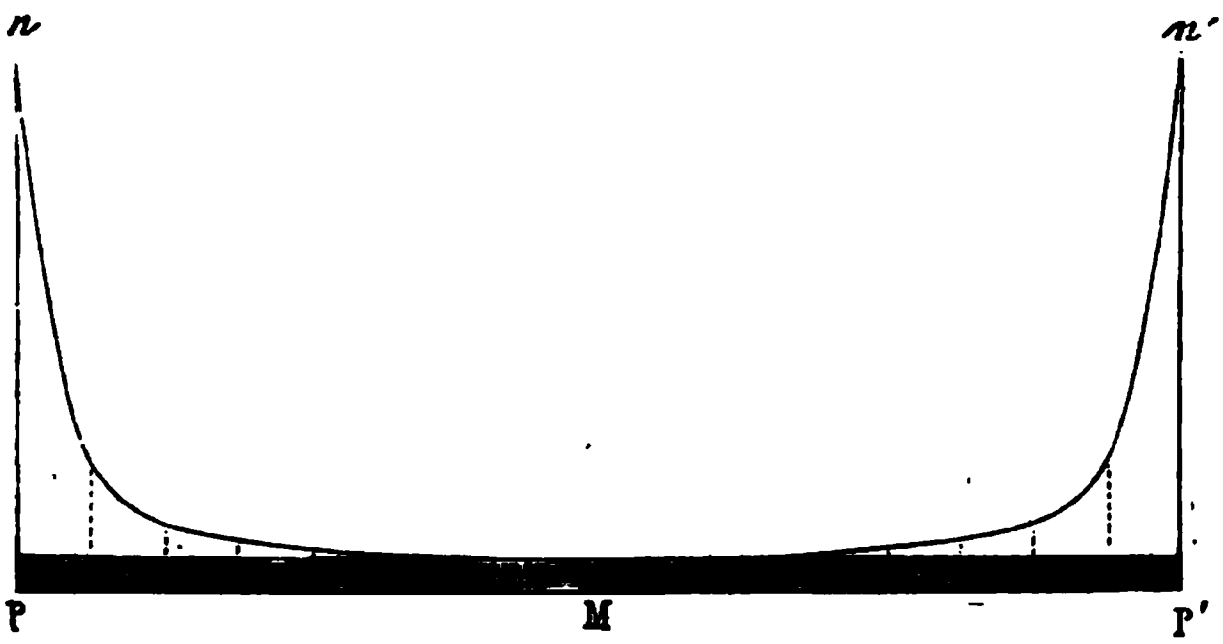


Fig. 362.

dans un même plan, et si l'on joint les extrémités de ces perpendiculaires par une courbe continue, on obtient une courbe semblable à celle que représente la figure 362.

492. **Lois des attractions et répulsions magnétiques.** — La loi suivant laquelle varient les attractions et les répulsions magnétiques avec la distance a été déterminée par Coulomb, soit par la méthode de la balance de torsion, soit par une autre méthode que nous ne décrirons pas.

Il est arrivé ce résultat que, comme pour l'électricité, *les forces répulsives qui s'exercent entre deux pôles de même nom, sont en raison inverse des carrés des distances.*

Les forces attractives qui s'exercent entre deux pôles de noms contraires suivent la même loi.

porte alors comme une réunion d'aimants, placés bout à bout et se touchant par les pôles du même nom.

II. — DU MAGNÉTISME TERRESTRE.

493. En considérant l'action exercée par la terre sur une aiguille aimantée mobile dans un plan horizontal, autour de son milieu, nous avons été conduits à assimiler cette action à celle d'un aimant puissant, orienté à peu près du nord au sud, et situé au voisinage du centre du globe (482). — Nous allons maintenant revenir sur cette assimilation et indiquer d'abord comment on peut vérifier les conséquences les plus simples qui s'en déduisent.

494. **L'action de la terre sur l'aiguille aimantée est une action purement directrice.** — Si l'on représente l'action que la terre exerce sur un barreau aimanté par celle d'un aimant puissant, situé au voisinage du centre du globe, on voit que chacun des pôles de cet aimant doit exercer son action sur les deux fluides magnétiques développés dans le barreau. Or la distance de chacun de ces pôles aux divers points du barreau étant très-grande, toutes les forces dues, par exemple, à l'action du pôle boréal de l'aimant terrestre sur le fluide austral des divers points du barreau peuvent être regardées comme parallèles entre elles : leur résultante est donc une force unique aC (*fig.* 363), appliquée en un point a du barreau, et dont la direction irait passer par le pôle boréal de l'aimant

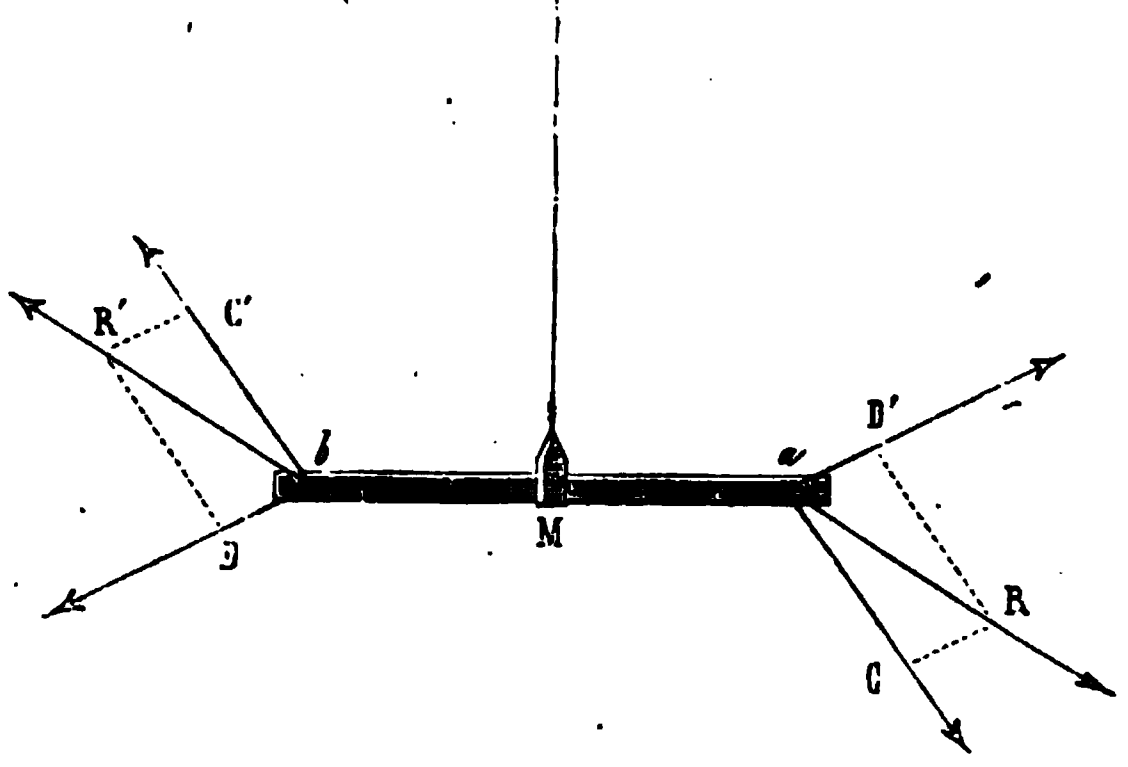


Fig. 363.

terrestre. Le même pôle boréal de la terre exerce, sur le fluide boréal des points du barreau qui sont situés symétriquement aux précédents par rapport au milieu, des actions égales et contraires aux précédentes : donc l'action du pôle boréal de la terre donne naissance à une autre force bC', appliquée en un point b symétrique de a par rapport au milieu, force

égale à aC, et qui doit être considérée comme lui étant parallèle, mais dirigée en sens contraire. — De même, l'action du pôle austral de la terre sur les deux fluides développés dans le barreau, se réduit à deux résultantes bD et aD', égales entre elles, parallèles et dirigées en sens contraire, et dont les directions iraient passer par le pôle austral de l'aimant terrestre (*).

Cela posé, les forces aC et aD', appliquées en même temps au point a, ont une résultante unique qui peut être représentée, pour sa direction et son intensité, par la diagonale aR du parallélogramme construit sur ces forces ; il en est de même du système des forces bC' et bD. Ces deux parallélogrammes étant égaux, leurs diagonales aR et bR' sont égales : enfin les parallélogrammes ayant leurs côtés respectivement parallèles, leurs diagonales sont aussi parallèles, et de plus elles sont dirigées en sens contraire, c'est-à-dire que les forces R et R′ constituent un *couple* (20).

Donc, l'hypothèse faite sur la position de l'aimant terrestre nous conduit à cette conséquence, que *l'action de la terre sur un aimant situé à sa surface doit se réduire à un couple*. Cette action ne doit tendre à imprimer aucun mouvement de translation à l'aiguille, mais simplement la faire tourner de manière que les deux forces qui la sollicitent se placent dans le prolongement l'une de l'autre.

495. **Vérification expérimentale du principe précédent.** — Les expériences suivantes permettent de vérifier qu'en effet l'action de la terre sur un aimant complétement libre ne tend à lui imprimer aucun mouvement de translation.

1° Si l'on fixe une aiguille aimantée sur un disque de liége flottant à la surface de l'eau, on voit cette aiguille tourner autour de son milieu, de manière à prendre une orientation déterminée, mais on n'observe jamais de mouvement de translation du disque vers un autre point du liquide. — Donc l'action de la terre ne développe aucune force tendant à produire un mouvement de translation horizontal.

2° Si l'on détermine, au moyen d'une bonne balance, le poids d'une aiguille avant de l'aimanter, et qu'on le détermine encore après l'aimantation, on constate qu'il est resté le même. — Donc l'aimantation ne développe aucune nouvelle force verticale, agissant sur l'aiguille.

(*) Ces deux résultantes bD et aD' doivent être, en général, considérées comme ayant une intensité différente de celles des premières aC et bC' : en effet, on comprend que, le barreau étant placé en un point quelconque de la surface du globe, il peut bien ne pas éprouver des actions égales de la part des deux pôles de l'aimant terrestre. — Cependant, elles sont appliquées aux mêmes points a et b que les premières : en effet, le point a par exemple est, par rapport à l'action du pôle boréal de l'aimant terrestre, le point d'application des forces parallèles dues à l'action de ce pôle sur le fluide austral des divers points du barreau ; si l'on considère maintenant l'action du pôle boréal de l'aimant terrestre sur ce même fluide austral, on voit qu'elle donne lieu à un même nombre de forces parallèles entre elles, dont les intensités sont respectivement proportionnelles aux premières : or, dans ce cas, le point d'application de la résultante reste le même, c'est le centre des forces parallèles (19). Le même raisonnement est applicable au point b.

De ces deux expériences, on peut conclure que l'action de la terre ne donne lieu non plus à aucune force tendant à entraîner l'aiguille dans une direction oblique. En effet, cette force, si elle existait, pourrait être décomposée en deux autres, l'une horizontale, l'autre verticale, et les deux expériences précédentes ont montré qu'il n'y a pas de composantes dans ces directions.

496. **Déclinaison et inclinaison.** — L'action magnétique de la terre sur un aimant se réduisant à un couple, si l'on pouvait suspendre une aiguille aimentée par son centre de gravité et lui donner une mobilité parfaite autour de ce point, la ligne des pôles prendrait, en chaque lieu, une direction déterminée qui serait précisément celle des forces du couple. Dans la pratique, il est impossible de réaliser rigoureusement ces conditions dans le mode de suspension de l'aiguille : on détermine alors la direction des forces du couple terrestre au moyen de deux expériences. — Les instruments qui sont employés à cet effet portent le nom général de *boussoles;* nous indiquerons d'abord, en quelques mots, le but qu'on se propose dans chaque expérience.

1° Supposons qu'un aimant mobile dans un plan horizontal, autour d'un axe vertical MN (*fig.* 364), soit d'abord orienté d'une manière quelconque.

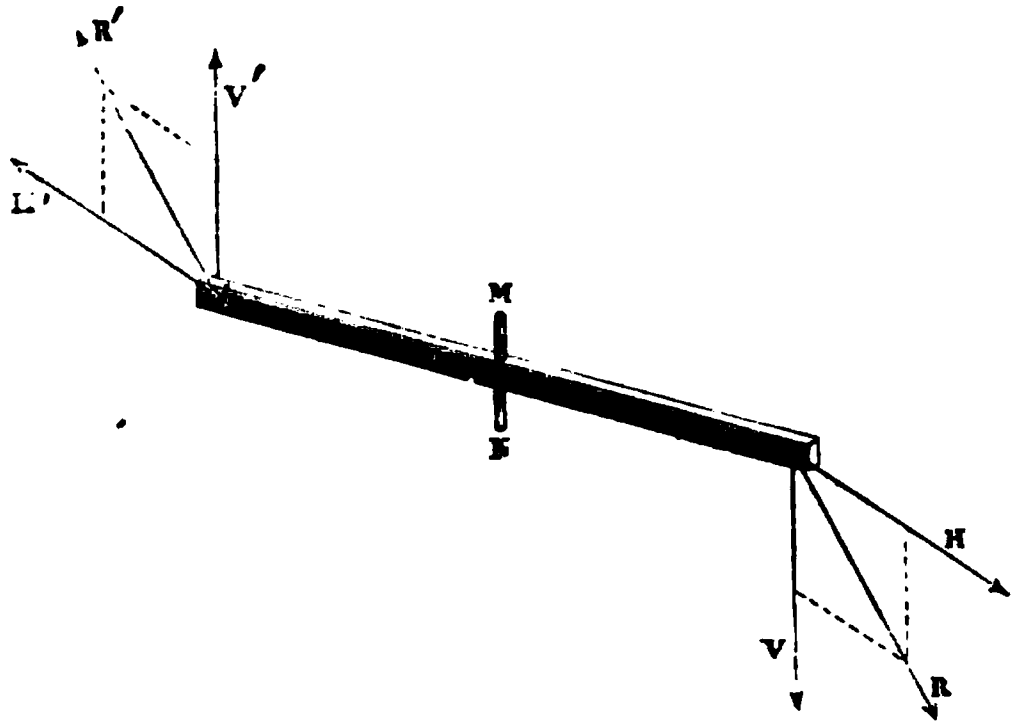


Fig. 364.

Chacune des forces qui le sollicitent, la force R par exemple, peut se décomposer en deux autres, l'une V verticale, l'autre H horizontale et située dans le même plan que R et V. La force R′ se décomposera de même en deux autres, qui seront respectivement égales et parallèles aux deux premières, mais dirigées en sens contraire. En d'autres termes le couple formé par les deux forces R et R′ se décompose en un couple de forces verticales V et V′, et en un couple de forces horizontales H et H′. — Les deux forces verticales V et V′ ne peuvent évidemment imprimer aucun mouvement à l'aimant, et n'ont d'autre effet que d'appuyer l'axe MN sur

ces supports ; les deux forces horizontales H et H′, au contraire, doivent faire tourner l'aimant autour de cet axe, jusqu'à ce qu'il se place dans la direction de ces forces elles-mêmes. — Il est aisé de voir que, au moment où le barreau arrive dans cette position, le plan vertical passant par la ligne des pôles contient aussi les forces R et R′ : or le plan vertical qui passe par la ligne des pôles d'un semblable aimant en équilibre est précisément ce que nous avons nommé le *méridien magnétique* du lieu (480) ; on voit donc que, en chaque point de la terre, si l'on connaît le méridien magnétique, on connaît par là même le plan qui contient les forces du couple terrestre en ce point.

On détermine, en général, la direction du méridien magnétique d'un lieu, en mesurant la *déclinaison* de ce lieu : on emploie, pour cela, la *boussole de déclinaison*. — Nous rappelerons ici qu'on nomme *déclinaison* d'un lieu, l'*angle dièdre que fait le méridien magnétique avec le méridien géographique*. Cet angle se mesure d'ailleurs par l'angle plan que fait une aiguille aimantée, mobile dans un plan horizontal avec la méridienne du lieu. — La déclinaison d'un lieu peut être *orientale* ou *occidentale* ; elle est dite orientale, si le pôle austral de l'aiguille se porte à l'est du méridien magnétique ; elle est dite occidentale, si le pôle austral se porte à l'ouest du méridien magnétique.

2° Supposons maintenant qu'on ait une aiguille aimantée, mobile dans un plan vertical, autour d'un axe horizontal qui passe par son centre de gravité. Si l'on oriente ce plan dans le méridien magnétique, il contiendra les directions des forces du couple terrestre : et, comme la pesanteur ne peut exercer aucune action sur l'aiguille (37), la direction dans laquelle se fixera la ligne des pôles sera précisément celle de ces forces elles-mêmes. L'expérience montre que, dans la plupart des points du globe, une aiguille ainsi assujettie s'incline de manière à faire un certain angle avec l'horizon.

On nomme *inclinaison* d'un lieu l'*angle aigu que fait la moitié australe d'une aiguille aimantée, mobile dans le méridien magnétique, avec la ligne horizontale menée par son centre dans le plan de ce méridien*. — L'appareil qui sert à mesurer cet angle est la boussole d'*inclinaison*.

La connaissance de la déclinaison et de l'inclinaison, pour chacun des points du globe, a par elle-même, indépendamment de la détermination de la direction des forces du couple terrestre, une grande importance dans les opérations qui se rattachent à une mesure géographique quelconque.

* 497. **Boussole de déclinaison.** — Une aiguille aimantée, mobile sur un pivot, est placée dans une boîte circulaire B (*fig.* 365). On fait en sorte que son point d'appui sur le pivot soit à la fois le centre de figure du losange, et le centre du cercle divisé *ee′* ; pour empêcher l'aiguille de s'incliner sur l'horizon, on a surchargé légèrement sa moitié boréale. — La boîte est en cuivre rouge bien pur, afin que ses parois n'exercent aucune

action sur l'aiguille aimantée. Deux montants verticaux de cuivre rouge O, O', supportent l'axe de rotation AA' d'une lunette L; l'axe optique de la lunette peut ainsi décrire un plan qui est perpendiculaire au plan du cercle *ee'*, et qui le rencontre suivant le diamètre mené par le zéro de la graduation. — L'ensemble de la boîte et des supports peut tourner autour d'un axe passant par le centre du cercle *ee'* et par le centre de rotation de la lunette. Au contraire le cercle CC', qui entoure la boîte et qui lui est concentrique, est fixé au pied H; on lui donne le nom de *cercle azimutal*.

Lorsqu'on veut observer la déclinaison magnétique d'un lieu, on *règle* d'abord l'instrument, au moyen des vis calantes et du niveau à bulle d'air N, de manière à rendre horizontal le plan du cercle azimutal CC', et par suite aussi le plan de *ee'* et celui que décrit l'axe de rotation de la lunette, dans toutes les positions qu'il peut prendre : il suffit, pour cela, de faire tourner tout le système sur le pied H, et de s'assurer, à l'aide du niveau, que l'horizontalité de l'axe est toujours conservée. — Cela fait, si l'on opère dans un observatoire où soient disposées des mires indiquant la direction du méridien géographique, on peut immédiatement, en visant ces mires avec la lunette, orienter la boîte B de façon que l'axe optique de la lunette et par suite le zéro du cercle *ee'* se placent dans ce méridien. La division du cercle à laquelle s'arrête alors le pôle austral de l'aiguille fait connaître la déclinaison (*).

Fig. 365. — Boussole de déclinaison.

(*) Les conditions dans lesquelles nous nous sommes placés, pour simplifier l'exposé de la méthode, sont tout à fait exceptionnelles : en général, il faut déterminer directement la direction du méridien géographique du lieu dans lequel se fait l'observation. Il suffit, pour cela, de viser avec la lunette L un astre connu, ce qui amène le plan vertical de la lunette à coïncider avec le plan vertical qui, au moment de l'observation, contient l'astre. On fait ensuite tourner la boîte B d'un angle égal à l'angle que forme, à l'heure vraie de l'observation, le vertical de l'astre avec le méridien astronomique du lieu; l'angle de rotation de la boîte peut d'ailleurs être mesuré avec précision, au moyen du vernier V qui parcourt le cercle azimutal. Le plan vertical passant par l'axe de la lunette et par le zéro de la graduation étant ainsi amené dans le méridien géographique, on mesure la déclinaison, comme nous l'avons dit, en observant la position de l'aiguille.

On voit sur la figure 365 un arc de cercle fixe U, parcouru par un vernier V' qui est

* 498. **Boussole de Gambey.** — A la boussole de déclinaison précédente, le constructeur Gambey en a substitué une autre, qui lui est de beaucoup préférable quand il s'agit de mesurer les petites variations qui

Fig. 366. — Boussole de Gambey (*).

surviennent dans la déclinaison d'un lieu ; on lui donne plus particulièrement le nom de *boussole des variations*.

L'aiguille mobile sur un pivot est remplacée par un barreau aimanté AB (*fig.* 366), supporté par un étrier de cuivre qui est suspendu lui-même

entraîné dans les mouvements de rotation de la lunette autour de son axe. — Cette pièce est destinée à donner l'*heure vraie* au moment de l'observation, lorsqu'on ne peut la connaître d'une autre manière : la position du vernier sur ce cercle, au moment où l'on vise l'astre, donne en effet l'inclinaison du rayon visuel sur l'horizon, c'est-à-dire la *hauteur* de l'astre au moment de l'observation : les tables astronomiques donnent immédiatement l'heure vraie correspondante.

(*) Cette figure est empruntée aux œuvres de É. Verdet, tome II.

à un long faisceau de fils de soie sans torsion : on supprime ainsi les frottements qui, dans l'appareil précédent, s'exerçaient entre l'aiguille et son pivot. Le barreau est terminé par deux anneaux de cuivre, A, B, dont chacun contient une croisée de fils : la ligne qui joint les deux points de croisement joue ici le même rôle que la ligne des pointes dans la boussole précédente. — Le treuil sur lequel s'enroule la partie supérieure du faisceau de fils de soie repose sur une traverse horizontale de cuivre PQ, fixée elle-même à deux colonnes verticales CE, DF ; le système entier peut tourner autour d'un axe vertical, en entraînant avec lui une alidade munie de deux verniers M, M′, qui se meuvent sur un cercle horizontal divisé. Sur les extrémités supérieures des colonnes verticales, reposent les tourillons d'un axe horizontal EF, qui porte une lunette GH dont l'axe optique lui est perpendiculaire.

Après avoir *réglé* l'appareil, c'est-à-dire après avoir fait en sorte que son axe de rotation soit exactement vertical, que l'axe EF soit exactement horizontal, et que l'axe optique de la lunette soit exactement perpendiculaire à EF, on aura à effectuer, pour déterminer la déclinaison du lieu, les opérations suivantes : — 1° déterminer la situation du méridien astronomique sur le limbe de l'instrument, en faisant tourner l'appareil autour de son axe vertical de façon que la lunette puisse être dirigée vers un astre connu, ou vers une mire éloignée, et en lisant la position des verniers des alidades M, M′ ; — 2° déterminer la situation du méridien magnétique, en faisant encore tourner l'appareil autour de son axe vertical, jusqu'à ce que la lunette vise la croisée de fils située à l'une des extrémités du barreau (*) et lisant de nouveau la position des verniers.

* 499. **Méthode du retournement de l'aiguille.** — Nous avons supposé jusqu'ici que la ligne des pôles coïncidait, soit avec la ligne qui joint les deux pointes de l'aiguille dans la boussole de déclinaison ordinaire, soit avec la ligne qui joint les deux croisées de fil dans la boussole de Gambey. Cette condition n'est pas toujours exactement réalisée : il est facile de reconnaître et de corriger les petites erreurs qui pourraient résulter de ce défaut de coïncidence.

Soit NS (*fig.* 367) la méridienne géographique, et supposons que l'aiguille de la boussole se soit arrêtée dans une position d'équilibre AB ; si les pôles *a* et *b* sont situés hors de la ligne des pointes, la valeur réelle de la déclinaison est exprimée par l'arc NM, compris entre la méridienne et la ligne des pôles : donc, dans ce cas, l'arc observé NA serait trop petit. Enlevons l'aiguille de son pivot, retournons-la de manière que la face qui était en-dessus se trouve en-dessous, et abandonnons-la de nouveau à elle-même ; la ligne des pointes, placée maintenant de l'autre côté de *ab*, se dirigera suivant A′B′ : la lecture de l'arc NA′ donnera donc une valeur

(*) Une disposition particulière de la lunette permet de viser aussi bien les objets rapprochés que les objets éloignés.

différente de la précédente, et, cette fois, trop grande. — Or, si l'on remarque que l'arc AM est égal à MA′, ou, en d'autres termes, que chacun d'eux est la moitié de AA′, on voit immédiatement que la déclinaison δ, mesurée par l'arc NM, s'obtient par la formule :

$$\delta = \frac{NA + NA'}{2}.$$

Donc si, après le retournement, l'aiguille fait avec le méridien géographique un angle différent de celui qu'elle faisait d'abord, on obtient la déclinaison du lieu en prenant la moyenne arithmétique de ces deux angles. — Le même procédé est évidemment applicable à la boussole de Gambey (*).

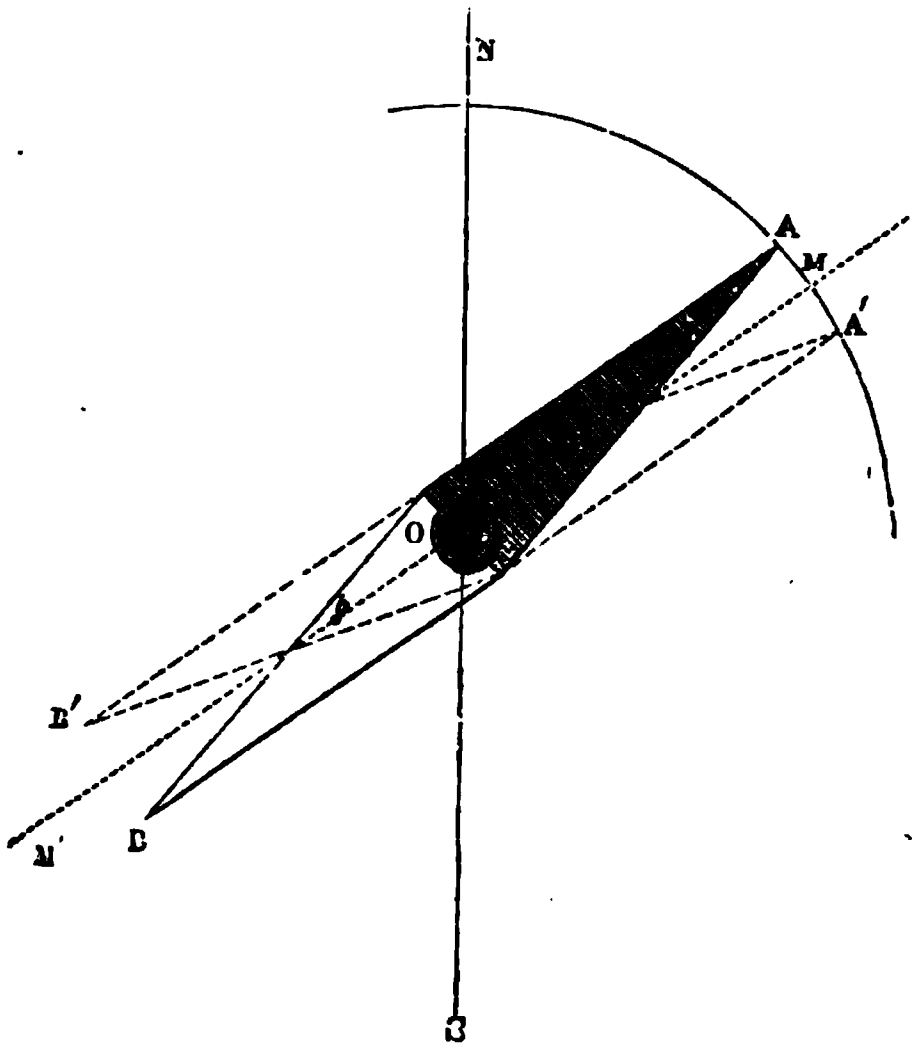


Fig. 367.

* 500. **Boussole marine.—Boussole d'arpentage.** — La boussole marine et la boussole d'arpentage sont des espèces de boussoles de déclinaison, plus simples que les précédentes.

La boussole marine se compose essentiellement d'une aiguille aimantée mobile sur un pivot vertical, et suspendue au centre d'une boîte qui se place toujours d'elle-même dans une position horizontale, malgré les oscillations du navire ; ce dernier résultat s'obtient à l'aide d'une suspension spéciale, dite *suspension de Cardan*. Une ligne fixe a été tracée sur le fond de la boîte, c'est la *ligne de foi*, qu'on place dans la direction de la quille du navire ; enfin, l'aiguille est fixée sur une lame circulaire de talc, qu'elle entraîne dans ses mouvements et sur laquelle sont tracés les degrés de la circonférence et la rose des vents. On peut donc observer, à chaque instant, l'angle que fait la ligne de foi avec l'aiguille, c'est-à-dire l'angle formé par la quille du navire avec le méridien magnétique. — Si l'on connaît en outre la déclinaison du lieu, il suffit de l'ajouter à cet angle ob-

(*) La figure 367 suppose que la ligne des pôles *ab* passe par le point de suspension O de l'aiguille. — Cette condition n'est pas toujours réalisée ; mais il est facile de voir que la même formule convient encore au cas où la ligne des pôles ne passerait pas par le point de suspension.

servé, ou de l'en retrancher, selon les cas, pour trouver l'angle que fait l'axe du navire avec le méridien géographique ; on reconnaît alors si le navire marche dans la direction qu'il doit suivre, et, s'il s'en écarte, on peut l'y ramener au moyen du gouvernail.

La boussole d'arpentage est d'une construction plus simple encore. Elle se compose d'une aiguille aimantée, mobile sur un pivot, au centre d'un cadran divisé qui est installé lui-même dans une sorte de boîte plate, de forme carrée. Une *ligne de foi* est tracée suivant le diamètre du cadran qui est parallèle à l'un des côtés de la boîte, et sur ce côté est fixée une petite lunette : lorsque la lunette est placée dans une direction déterminée, la position de l'aiguille sur le cadran donne immédiatement l'angle de cette direction avec le méridien magnétique, et par suite son orientation.

Inversement, ces instruments peuvent servir à déterminer, en voyage, la déclinaison d'un lieu, avec une certaine approximation, lorsqu'on a déterminé la direction du méridien géographique.

501. **Boussole d'inclinaison.** — La boussole d'inclinaison, dont nous avons déjà indiqué le but (496, 2°), est représentée par la figure 368. L'aiguille aimantée est mobile autour d'un axe formé par deux cylindres d'acier poli, qui viennent porter sur des couteaux d'agate soutenus par les traverses horizontales t, t' ; le limbe ll' sur lequel se meut l'aiguille est fixé perpendiculairement à la plaque métallique PP' ; le niveau à bulle d'air n permet de régler l'horizontalité de cette plaque, au moyen des vis calantes de l'instrument. La plaque peut tourner, avec tout ce qu'elle supporte, autour de l'axe vertical du pied H, en entraînant avec elle le vernier V ; celui-ci se meut sur un limbe horizontal CC', qui est fixé invariablement au pied de l'instrument, et dont le centre est sur l'axe de rotation. De là résulte que le déplacement du vernier sur le limbe fait connaître d'une manière précise la valeur de l'angle de rotation.

Fig. 368. — Boussole d'inclinaison.

Pour déterminer l'inclinaison d'un lieu, on règle d'abord les vis calan-

tes de façon que la plaque PP′ soit bien horizontale, et que, par suite, l'axe de rotation et le limbe *ll′* soient bien verticaux. — On place ensuite le limbe dans le plan du méridien magnétique, ce qui est facile si l'on connait le méridien géographique du lieu et l'angle de déclinaison. — La position de l'extrémité australe de l'aiguille sur le limbe fait connaître l'inclinaison du lieu (*).

Pour corriger les erreurs qui peuvent tenir à ce que la ligne des pôles de l'aiguille ne coïncide pas exactement avec la ligne des pointes, on peut encore avoir recours à la méthode du retournement (499), et prendre la moyenne des deux observations.

502. **Résultats.** — La comparaison des données fournies par l'observation des boussoles de déclinaison et d'inclinaison, faite, soit en différents lieux, soit à diverses époques en un même lieu, a conduit à un certain nombre de résultats qui trouveront mieux leur place dans l'exposé général des faits qui se rattachent à la Météorologie (livre VI). Nous nous contenterons d'ajouter ici que l'état du magnétisme terrestre, lorsqu'on le considère à un moment déterminé, paraît être un peu plus compliqué que ne l'indiquerait l'existence de deux centres d'actions, situés au voisinage du centre de la terre, et que cet état est soumis, en outre, d'un moment à l'autre, à des changements continuels. — Dès lors, on ne doit regarder l'hypothèse de l'*aimant terrestre* que comme un moyen commode de grouper un certain nombre de faits, et non comme une expression matérielle exacte de la réalité.

III. — PROCÉDÉS D'AIMANTATION — CONSERVATION DU MAGNÉTISME DANS LES AIMANTS

503. **Procédé d'aimantation de l'acier par le contact des aimants.** — Chacun sait que le frottement d'un objet d'acier sur un aimant développe dans cet objet la propriété d'attirer le fer. Les physi-

(*) Nous avons supposé connu le plan du méridien magnétique : si l'on ne connait pas ce plan, il est toujours possible de le déterminer avec la boussole elle-même. — Supposons, en effet, que le plan du limbe ait été placé *perpendiculairement au méridien magnétique* du lieu : les forces du couple terrestre étant situées dans le plan du méridien magnétique, chacune d'elles pourra être décomposée en deux autres forces dirigées, l'une horizontalement, l'autre verticalement dans ce plan. En d'autres termes, le couple terrestre pourra être remplacé par deux autres : l'un de ces couples, ayant ses forces horizontales et perpendiculaires au plan dans lequel se meut l'aiguille, ne pourra lui imprimer aucun mouvement ; l'autre, ayant des forces verticales et situées dans le plan même du limbe, amènera l'aiguille dans une position verticale. On voit d'ailleurs que cette position du limbe est la seule pour laquelle l'aiguille se place verticalement. — Donc réciproquement, pour orienter le limbe dans le méridien magnétique, on pourra lui donner d'abord, par tâtonnements, une orientation telle, que l'aiguille s'arrête dans une position verticale. Il suffira de faire tourner ensuite ce plan de 90 degrés, pour qu'il arrive à coïncider avec le plan du méridien magnétique lui-même ; la rotation se mesurera par le déplacement du vernier V sur le cercle CC′.

ciens ont perfectionné ce procédé, de façon à développer, soit dans des aiguilles, soit dans des barreaux, une aimantation maximum. — Les méthodes usitées peuvent se ramener à trois principales : la méthode de la *simple touche*, celle de la *touche séparée* et celle de la *double touche*.

504. **Méthode de la simple touche.** — Le procédé d'aimantation par simple touche consiste à frotter perpendiculairement l'objet qu'on veut aimanter, une aiguille d'acier, par exemple, sur l'extrémité d'un barreau puissant, en la faisant glisser suivant sa longueur, et toujours dans le même sens. — Pendant ce mouvement, les divers éléments magnétiques de l'aiguille arrivent successivement en présence de l'extrémité du barreau : sous l'influence de l'ébranlement qui est produit par le frottement et qui diminue momentanément la force coercitive, les fluides obéissent aux actions qu'exerce sur eux le pôle du barreau, et se séparent en quantités d'autant plus grandes que ce pôle est plus énergique. D'ailleurs, ces actions ne cessent pas quand ces points ont dépassé l'extrémité du barreau : si c'est, par exemple, l'extrémité australe qu'on emploie, on voit qu'elle doit continer à exercer, *dans les éléments qui l'auront dépassée*, une attraction sur le fluide boréal, et une répulsion sur le fluide austral : ces deux actions iront en diminuant d'intensité pour chaque élément, à mesure qu'il s'éloignera du pôle du barreau, mais elles s'exerceront toujours dans le même sens. On conçoit donc que, le mouvement une fois terminé, chaque élément doive conserver une quantité de fluides séparés dépendante de sa position par rapport aux autres éléments (489) et de sa force coercetive ; les pôles de ce nouvel aimant seront d'ailleurs placés de telle sorte, que, dans la moitié de l'aiguille qui sera arrivée la dernière au contact de l'extrémité du barreau, se trouve un pôle de nom contraire à celui de cette extrémité. — Ce procédé fournit une aimantation assez régulière, mais peu énergique, et n'est applicable qu'aux aiguilles ou aux barreaux de petites dimensions.

505. **Méthode de la touche séparée.** — Le procédé de la touche séparée, indiqué par Duhamel pour communiquer une aimantation régulière et énergique aux aiguilles de boussole, et en général aux lames d'acier un peu minces, consiste dans la série d'opérations suivantes. — On installe solidement, sur un plan horizontal, deux aimants puissants AM, BM′ (*fig.* 369), qu'on sépare par une règle de bois L de même épaisseur : au-dessus, on place la lame à aimanter *ab*, comme l'indique la figure, de manière que ses extrémités soient en présence de deux pôles contraires A et B. L'expérimentateur, prenant dans chaque main un barreau

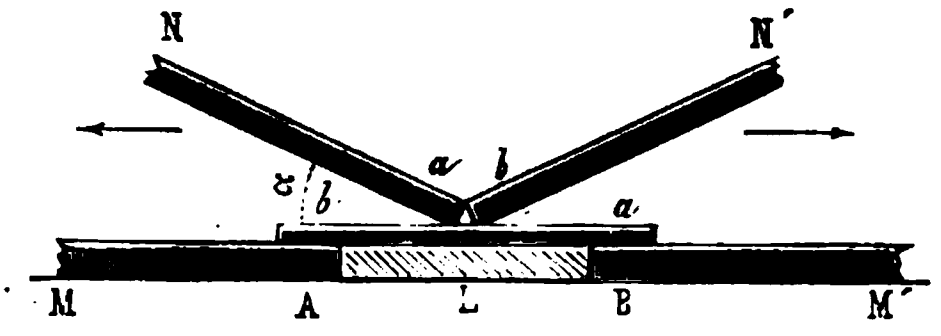


Fig. 369. — Aimantation par touche séparée.

aimanté, appuie ces deux barreaux sur le milieu de la lame, en plaçant le pôle austral *a* de l'un des barreaux N du même côté que le pôle A, le pôle boréal *b* de l'autre barreau N′ du même côté que le pôle B : il les incline alors de manière que leurs directions fassent avec chacune des moitiés de la lame des angles de 30° environ, et les fait glisser en sens contraire, chacun vers l'une des extrémités, comme l'indiquent les flèches dans la figure ci-dessus. Ce mouvement terminé, on enlève les deux barreaux en même temps, on les reporte au milieu de la lame, et on recommence l'opération un certain nombre de fois. — On reconnaît d'abord que, dans cette méthode, les barreaux mobiles agissent isolément, sur les éléments en présence desquels ils arrivent, comme l'aimant unique dans le procédé de la simple touche ; mais, en outre, chacun d'eux agit encore de la même manière sur les éléments qui restent dans leur intervalle à mesure qu'ils s'éloignent l'un de l'autre, et les actions exercées par l'un et l'autre aimant sur les fluides d'un même élément *concordent* pour maintenir ces fluides séparés. Les barreaux fixes AM et BM′ ont une influence qui agit dans le même sens.

506. **Méthode de la double touche.** — Le procédé d'aimantation par *double touche*, imaginé par Mittchell et perfectionné par Æpinus, est surtout applicable aux barreaux d'acier de dimensions considérables. — Le barreau à aimanter étant installé sur deux barreaux fixes, comme dans la méthode précédente, on place sur son milieu deux autres barreaux (*fig.* 370), inclinés seulement d'environ 20°, et séparés par une petite cale de bois. On les fait glisser ensemble et d'un mouvement régulier vers l'une des extrémités *a*, puis de cette extrémité vers l'autre *b*, et ainsi de suite ; enfin, on doit toujours terminer l'opération par l'extrémité opposée à celle qu'on a parcourue la première, et revenir de cette extrémité jusqu'au milieu du barreau. — On voit que, pendant tout le mouvement, les deux pôles contigus des barreaux mobiles exercent des actions contraires sur les éléments qui sont en dehors de l'intervalle qu'ils comprennent, en sorte qu'ils ne peuvent guère avoir d'action, soit pour y développer le magnétisme, soit pour modifier leur état magnétique quand ils sont déjà aimantés. Ces deux pôles exercent, au contraire, des actions extrêmement énergiques et *concordantes* sur les éléments placés au-dessous du petit intervalle qui sépare leurs extrémités ; comme ils passent successivement au-dessus de tous les points du barreau à aimanter, ils y développent une aimantation régulière, et la répartition des fluides se fait ensuite dans les divers éléments, d'après les lois précédemment indi-

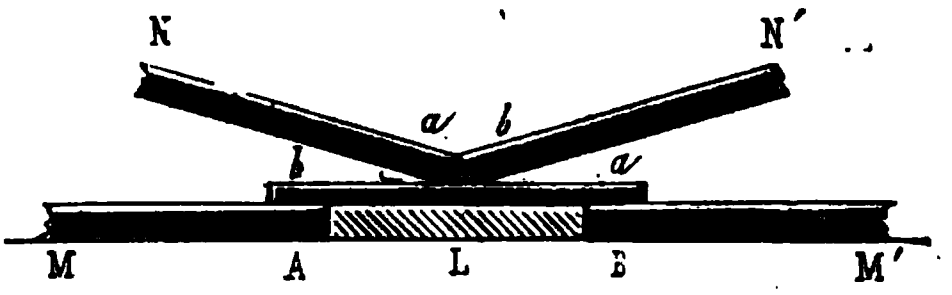


Fig. 370. — Aimantation par double touche.

quées (489). Les aimants fixes AM et BM′ ont une influence qui concorde avec l'action des barreaux mobiles.

507. **Aimantation par l'action de la terre.** — L'action magnétique du globe étant comparable à celle d'un aimant puissant, il est naturel de penser que son influence doit pouvoir développer dans le fer doux une aimantation passagère, et dans l'acier une aimantation durable.

L'expérience montre en effet que, si l'on maintient une barre de fer dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, c'est-à-dire dans la direction même où l'action de la terre tendrait à placer la barre si elle était aimantée, elle s'aimante par influence; son extrémité inférieure acquiert un pôle austral, et son extrémité supérieure un pôle boréal. Mais, comme le fer n'a pas de force coercitive, l'aimantation disparaît dès qu'on place la barre dans une direction qui s'écarte beaucoup de celle de l'aiguille d'inclinaison. — Toutefois, une barre de fer ordinaire peut acquérir un certain degré d'aimantation permanante, quand, après l'avoir fixée parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, on la frappe de quelques coups de marteau à l'une de ses extrémités. — Des faisceaux de fils de fer placés de la même manière deviennent aussi, quand on les tord, de véritables aimants.

Enfin des barreaux d'acier, maintenus dans cette même direction et soumis à des frottements ou à des chocs répétés, acquièrent une aimantation toujours sensible, et quelquefois très-énergique. Cette aimantation persiste indéfiniment, quand la trempe leur a donné une force coercitive suffisante. — C'est ainsi qu'on peut s'expliquer comment les limes, et tous les outils d'acier ou de fer qui sont, par leurs usages eux-mêmes, soumis à de fréquentes vibrations, donnent presque toujours des signes d'aimantation manifestes.

508. **Influence de la trempe et de la température sur les intensités magnétiques.** — Lorsqu'on soumet un barreau d'acier aux procédés d'aimantation les plus puissants, on constate qu'il acquiert d'abord une intensité magnétique très-grande, et qui varie avec la méthode employée; mais cette intensité diminue dans les instants qui suivent, et tend en général vers un état permanent, toujours le même, quelle que soit la méthode dont on ait fait usage : on dit alors que le barreau est aimanté *à saturation*.

D'après les expériences de Coulomb, un barreau aimanté à saturation conserve une intensité magnétique d'autant plus grande qu'il a été trempé à une température plus élevée. — Inversement, un même barreau, trempé d'abord très-dur et recuit ensuite à des températures différentes, puis aimanté à saturation après chaque recuit, peut acquérir une intensité magnétique d'autant moindre qu'il a été recuit à une température plus élevée.

Si l'on fait intervenir l'élévation de température après l'aimantation, on

arrive à des résultats semblables. — Si l'élévation de température est très-petite, et comparable à celles qui surviennent dans l'atmosphère, l'intensité magnétique ne subit qu'une diminution passagère est très-faible. — Quand on élève davantage la température, l'intensité magnétique éprouve une diminution qui est permanente, même après le refroidissement. Coulomb a vérifié que cette diminution est d'autant plus grande que la température a été plus élevée; plus anciennement, Gilbert avait constaté qu'un aimant perd toute trace d'aimantation quand on le chauffe jusqu'au rouge.

Enfin, on doit à Pouillet cette curieuse remarque que les corps sans force coercitive, comme le fer doux, chauffés à une certaine température, sont insensibles aux aimants : ils cessent d'être attirés, et deviennent semblables au cuivre ou aux autres substances non magnétiques. — La température à laquelle ce phénomène se produit n'est d'ailleurs pas la même pour les diverses substances magnétiques : ainsi le nickel cesse d'être magnétique à 350°; le fer, à la température du rouge cerise; le cobalt, à une température beaucoup plus élevée.

509. **Conservation du magnétisme. — Armures et contacts des aimants.** — Un grand nombre de causes tendent à diminuer l'intensité magnétique dans les aimants : telle est l'influence de la terre, qui peut tendre à y produire une aimantation inverse : tel est aussi le voisinage d'autres aimants. Telles sont enfin, dans certaines limites, les variations de température (508).

Pour combattre ces causes d'affaiblissement, on place, en contact avec les aimants, des pièces de fer doux ou *armures* qui s'aimantent par influence et maintiennent les fluides séparés dans les aimants eux-mêmes. — Pour conserver, par exemple, les barreaux aimantés qui se trouvent dans les cabinets de physique, on les met deux par deux, dans une même boite, parallèlement et les pôles de noms contraires en regard les uns des autres : c'est la position qu'indique la figure 371 pour les deux barreaux M et M'. Pour les empêcher de se rapprocher, on place entre eux de petites cales de bois, et on applique en travers, sur les deux extrémités, de petits barreaux de fer doux *ab*, *ab*. Chacune de ces armures éprouve, de la part des pôles des deux aimants, des actions concordantes, et acquiert une aimantation qui réagit sur celle des aimants et la conserve.

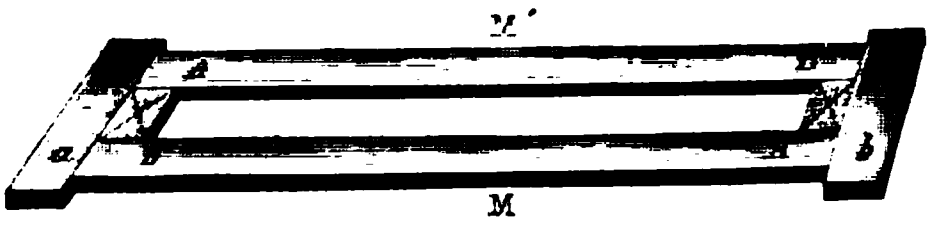


Fig. 371.

Les aimants naturels sont presque toujours munis d'armures qui y sont invariablement fixées. La figure 372 représente un aimant naturel E, qui est assujetti entre deux armures de fer terminées par des talons A, B, qui constituent des pôles de noms contraires. La pièce de fer doux C, qu'on

nomme le *contact*, subit les influences concordantes des deux armures, et joue elle-même le rôle d'une sorte d'armure, qui a pour effet d'augmenter la séparation des fluides.

La figure 372 représente, suspendu au contact, un petit seau de métal V, dans lequel on place des grains de plomb ; l'expérience montre que, si l'on a soin de *nourrir* l'aimant, c'est-à-dire d'augmenter progressivement les poids qu'il supporte, on peut arriver à lui faire soutenir une charge double de celle qu'il portait d'abord. On doit avoir soin cependant de ne pas augmenter trop rapidement les poids ; car, si le contact se détache sous une charge excessive, l'aimant devient tout à coup moins énergique qu'il ne l'était primitivement. Il faut recommencer à le nourrir avec une charge moindre, pour lui rendre peu à peu sa force. — Enfin les aimants naturels, abandonnés à eux-mêmes sans armures ni contact, perdent leur aimantation assez rapidement : ils ne conservent leur force que si l'on a soin de leur faire porter toujours des charges suffisantes.

Fig. 372. — Aimant naturel.

Fig. 373. — Aimant en fer à cheval.

On donne quelquefois aux aimants artificiels la forme d'un fer à cheval (*fig.* 373). Une pièce de fer doux C, s'appliquant sur les deux pôles A et B de l'aimant, joue à la fois le rôle d'une armure qui maintient séparés les fluides de l'aimant, et d'un contact auquel on peut faire supporter des poids. Cette pièce, mise en présence des deux pôles et soumise ainsi à deux influences *dont chacune tend à accroître l'aimantation développée par l'autre*, peut soutenir une charge supérieure au double du poids que supporterait un seul pôle du même aimant.

CHAPITRE III

ÉLECTRICITÉ VOLTAÏQUE

I. — PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX — DESCRIPTION DES PRINCIPALES ESPÈCES DE PILES

510. **Électricité dynamique. — Production des courants électriques par les actions chimiques.** — Lorsqu'on plonge dans de l'acide sulfurique étendu d'eau une lame de zinc ordinaire Z (*fig.* 374), l'eau est décomposée : son oxygène se porte sur le métal pour l'oxyder, et son hydrogène se dégage en bulles gazeuses au milieu du liquide; c'est sur cette réaction qu'est fondée la méthode qu'on emploie en Chimie pour préparer l'hydrogène. Or, si l'on met la lame de zinc en communication avec l'un des plateaux de l'électroscope condensateur (*fig.* 328), on constate que, à mesure que l'oxydation s'effectue, le métal se charge d'électricité *négative*. Du reste, dans ce cas comme dans tous ceux où l'une des deux électricités se produit, l'électricité contraire se produit en même temps; on peut le vérifier en plongeant dans l'eau acidulée un corps conducteur non attaquable par ce liquide, comme une lame de platine, ou seulement un corps moins attaquable que le zinc, comme une lame de cuivre C : si l'on fait communiquer cette lame avec l'électroscope condensateur, on constate qu'elle se charge d'électricité *positive*.

Fig. 374.

On nomme *couple* l'ensemble de deux corps conducteurs et d'un liquide exerçant spécialement sur l'un d'eux une action chimique : chacun de ces deux corps prend le nom de *pôle du couple :* l'un est le pôle *positif*, l'autre est le pôle *négatif*.

Lorsqu'on réunit entre eux plusieurs couples semblables, on forme une *pile*, et chaque couple devient un *élément de pile*. — On joint ordinairement, par un fil ou par une lame métallique, le pôle de chaque couple au pôle contraire du couple suivant. En faisant usage, par exemple, d'éléments semblables à celui que nous venons de décrire, on joindra le cuivre

Fig. 375. — Pile à tasses.

du premier couple au zinc du second (*fig.* 375); puis le cuivre du second au zinc du troisième, et ainsi de suite. De cette façon, il n'y a de libres que le zinc du premier élément et le cuivre du dernier. — Or, si l'on réunit ainsi quinze éléments, par exemple, l'expérience montre que la charge négative sur la première lame de zinc est égale à quinze fois celle qu'on aurait observée sur un élément unique, et il en est de même de la charge positive sur la dernière lame de cuivre : ces deux lames extrêmes prennent alors le nom de *pôles de la pile*. Ces pôles sont encore de noms contraires, et l'on voit, d'après ce que nous venons de dire, que *le pôle zinc est le pôle négatif*, et que *le pôle cuivre est le pôle positif*.

La pile dont il vient d'être question, et qui a été quelquefois employée, est connue sous le nom de *pile à tasses*.

Si l'on adapte un fil métallique à chacune des lames extrêmes qui forment les pôles d'une pile, et qu'on approche ensuite ces deux fils l'un de l'autre, on peut (avec un nombre suffisant d'éléments et dans des circonstances qui seront étudiées plus loin) obtenir une étincelle; cette étincelle se reproduit chaque fois qu'on approche ou qu'on sépare les deux fils, lors même qu'on répète l'expérience un grand nombre de fois et à de courts intervalles. Donc, quand on effectue la combinaison des fluides accumulés dans les fils, il s'en reproduit instantanément une quantité nouvelle.

On est ainsi conduit à admettre que, lorsqu'on réunit définitivement les deux fils, de manière à établir une communication permanente entre le zinc et le liquide, il se fait, dans ces fils, une recomposition continuelle des fluides dégagés par l'action chimique, et une reproduction incessante

de ces fluides. — On a donné le nom de *courant électrique* à ce mouvement continu des fluides, à travers le circuit formé par la pile et par les corps conducteurs qui en réunissent les deux pôles. Dans la théorie des deux fluides que nous avons adoptée, il faut admettre que le fluide positif circule, dans le fil métallique, du pôle positif au pôle négatif de la pile, et que la circulation de l'autre fluide a lieu en sens contraire. Mais, pour distinguer entre elles les deux extrémités d'un conducteur parcouru par un courant, on est convenu d'appeler spécialement *sens du courant* le sens dans lequel circule le fluide positif; on regarde donc le *courant* comme allant *du pôle positif au pôle négatif, dans la partie du circuit qui est extérieure à la pile elle-même.*

L'électricité, considérée comme se mouvant ainsi dans un circuit fermé a reçu le nom d'électricité *en mouvement*, ou d'électricité *dynamique.*

511. **Découverte de l'électricité dynamique. — Expérience de Galvani.** — L'expérience qui fut pour Galvani, en 1786, l'origine de la découverte de l'électricité dynamique peut être répétée comme il suit :

On coupe en deux, vers la région lombaire, la colonne vertébrale d'une grenouille récemment tuée, et l'on prend seulement la partie du corps qui est au-dessous de cette section : après l'avoir dépouillée, on distingue immédiatement, de chaque côté de la colonne vertébrale, deux faisceaux blanchâtres, qui sont la réunion des nerfs lombaires se rendant aux membres inférieurs; on prend alors un arc métallique COZ (*fig.* 376), formé d'un fil de cuivre C et d'un fil de zinc Z, que l'on réunit en O. On engage l'un de ces fils sous les faisceaux des nerfs lombaires, comme le montre la figure : si alors on vient à toucher, avec l'autre branche, les muscles de l'une des cuisses, on voit la cuisse se contracter ; le même phénomène se reproduit à chaque nouveau contact, pendant plusieurs heures (*).

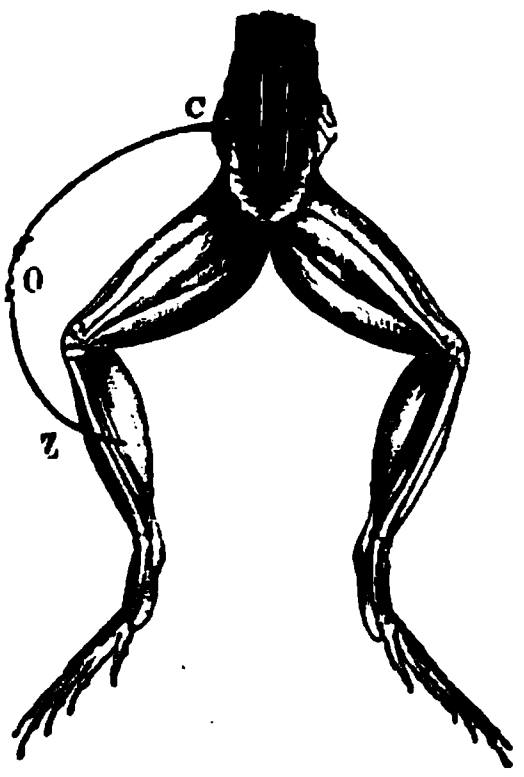


Fig. 376.

Ces contractions rappellent celles qui se manifestent quand deux électricités contraires se combinent à travers le corps d'un animal : par exemple, quand on réunit avec les mains les deux armatures d'une bou-

(*) Cette expérience se présenta à Galvani d'une manière presque fortuite : Les membres inférieurs de plusieurs grenouilles avaient été préparés comme nous venons de le dire, et suspendus à un balcon de fer, par un crochet de cuivre qui traversait la moelle épinière ; le but du savant professeur d'anatomie était d'étudier l'influence que peuvent exercer sur le système nerveux les décharges qui s'effectuent entre des nuages orageux peu éloignés. Contre son attente, il vit les membres s'agiter de mouvements convulsifs, en l'absence de tout orage, chaque fois que le vent amenait les muscles au contact des barreaux de fer.

teille de Leyde. Aussi Galvani vit-il d'abord dans le muscle un véritable condensateur, chargé de l'une des électricités à l'intérieur, c'est-à-dire dans les points où pénétrait le nerf, et d'électricité contraire à l'extérieur ; l'arc métallique jouait alors le rôle d'excitateur, qui établissait la communication entre les deux armatures. — Toutefois, le fluide ainsi développé parut à Galvani différer, à certains égards, du fluide électrique ordinaire : on le nomma alors fluide *vital* ou fluide *galvanique*.

512. **Théorie et expériences de Volta.** — La théorie de Galvani, acceptée d'abord sans contestation, trouva bientôt un contradicteur dans Volta, alors professeur à Pavie. Ce physicien reconnut que, pour obtenir des contractions un peu énergiques, il est *nécessaire* d'employer un arc formé de deux métaux différents. De là une nouvelle théorie, qui fut bientôt généralement adoptée, et d'après laquelle la production de l'électricité devait être attribué au *contact de deux corps de natures différentes*. — Selon Volta, c'est au contact du zinc et du cuivre que se produisait l'électricité dans l'expérience de Galvani, en vertu d'une *force électro-motrice* spéciale ; c'est la combinaison des deux fluides, à travers les nerfs et les muscles, qui déterminait la contraction (*).

Volta eut recours à un grand nombre d'expériences tendant à prouver l'existence de cette force électro-motrice. Voici quelques-unes des plus célèbres :

1° Afin qu'on ne pût attribuer au frottement le développement d'électricité qui s'effectuait, selon lui, au contact de deux métaux, il fit souder l'une à l'autre deux petites lames, l'une de zinc Z, l'autre de cuivre C (*fig.* 377) ; prenant alors à la main l'extrémité zinc, il mit en communication l'extrémité cuivre avec le plateau supérieur d'un électroscope condensateur, en faisant d'ailleurs communiquer le plateau inférieur avec le sol, comme il a été dit (463). L'expérience montre que la lame agit sur l'appareil comme une source d'électricité négative : il fallait donc admettre, d'après la théorie de Volta, que le contact du zinc et du cuivre développe une force électro-motrice qui charge le cuivre d'électricité négative.

2° Au contraire, quand il prenait la lame par l'extrémité cuivre, et qu'il touchait le plateau avec l'extrémité zinc, il n'observait pas de traces sensibles d'électricité.

3° Enfin la lame étant placée de la même manière, si l'on avait soin d'interposer, entre elle et le plateau, une petite bande de papier mouillé

(*) Dans la théorie de Volta, l'influence de l'hétérogénéité des substances en contact était si grande, que l'électricité pouvait se produire même lorsqu'on mettait en contact des muscles et des nerfs. C'est ainsi que fut interprétée une expérience célèbre, due à Galvani et à son neveu Aldini, et par laquelle ils avaient cru répondre victorieusement aux objections de Volta : en détachant simplement les nerfs lombaires et les rejetant sur les muscles de la cuisse, on observe des contractions ; pour Volta, c'est le contact des deux tissus différents qui donne lieu au développement de l'électricité.

avec de l'eau acidulée, elle agissait comme une source d'électricité positive.

D'après Volta, la différence entre ces deux derniers résultats était une confirmation de la théorie. En effet, lorsque la lame de zinc se trouvait en contact direct, d'une part avec le cuivre qui y est soudé, d'autre part avec

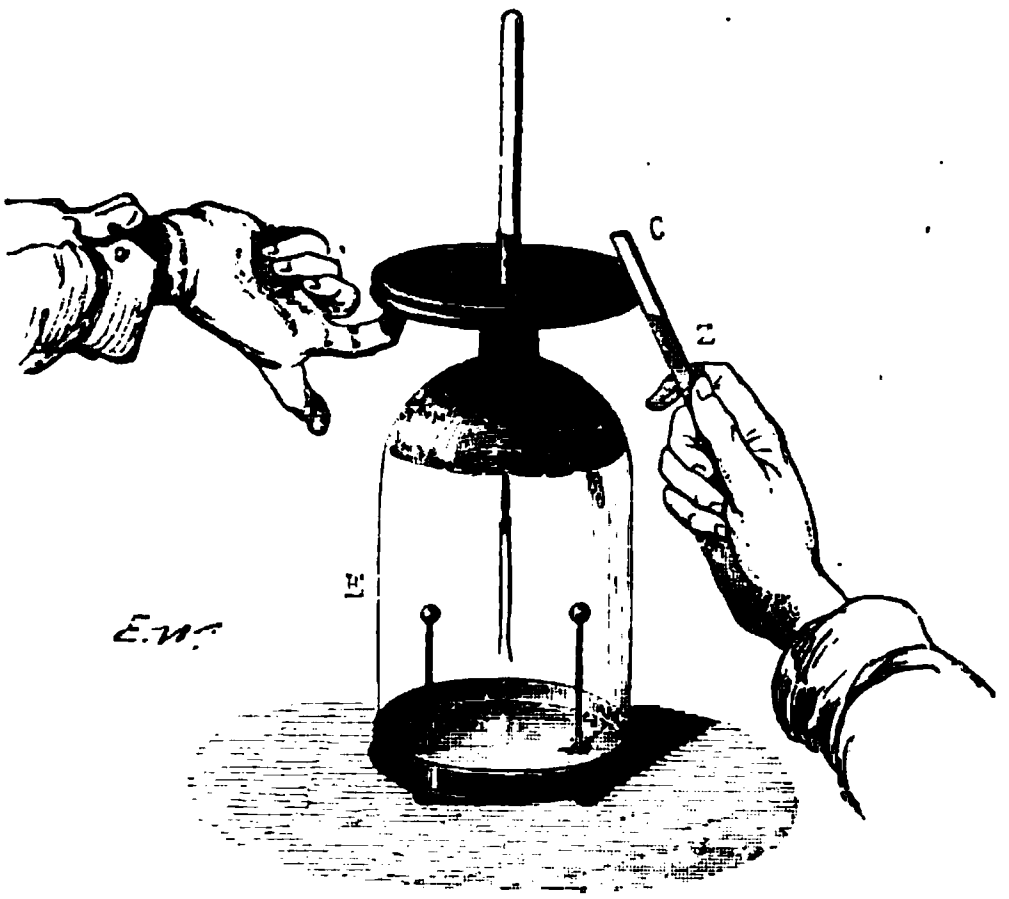


Fig. 377.

le cuivre du plateau, il se développait, à ses deux extrémités, des forces électro-motrices égales et de sens contraires, en sorte que l'effet devait être nul. Au contraire, lorsqu'on plaçait entre le zinc et le plateau une feuille de papier mouillé, l'action de la force électro-motrice au contact des métaux soudés pouvait se manifester, et la feuille de papier agissait alors comme un simple conducteur, transmettant au plateau l'électricité positive du zinc.

513. **Interprétation des résultats qui précèdent, dans la théorie chimique.** — Les théories de Galvani et de Volta ont eu dans la science un tel retentissement, les expériences qui ont été faites pour les appuyer ont conduit à de si grandes découvertes, qu'il nous était impossible de les passer sous silence ; mais il est facile de voir que, dans chacune des expériences qui précèdent, il y a, ou non, manifestation d'électricité, suivant qu'il peut se produire, ou non, une action chimique. — Dans la première expérience de Volta (512, 1°), l'humidité acide, dont les mains sont toujours plus ou moins imprégnées, suffit pour attaquer le zinc et le charger d'électricité négative que le cuivre transmet à l'électroscope : Volta avait d'ailleurs remarqué lui-même que la charge de l'instrument augmente quand les doigts sont mouillés avec de l'eau aci-

dulée. Quant au fluide positif engendré par cette même action, il s'écoule dans le sol par la main elle-même. — Dans la seconde expérience, il n'y a pas de fluide développé, parce qu'il ne peut y avoir d'action chimique. — Enfin, dans la troisième, le papier imprégné d'eau acidulée se charge d'électricité positive qu'il transmet au plateau, tandis que la lame de zinc se charge d'électricité négative, qui s'écoule dans le sol par le cuivre et la main.

Il en est de même de l'expérience de Galvani (511), où la cause qui produit l'électricité réside *principalement* dans l'action des liquides animaux sur le métal le plus attaquable. — Seulement, dans ce cas, le choix de cet électroscope particulier, de nature animale, complique un peu les phénomènes, en y introduisant quelques conditions nouvelles sur lesquelles nous ne pouvons nous étendre ici.

514. **Pile de Volta.** — Parmi les découvertes auxquelles Volta fut conduit par la théorie dont nous venons de donner une idée, la plus féconde en résultats est sans contredit la *pile à colonne*, imaginée en 1794, et qui fut l'origine de toutes les autres piles. — Volta la construisait en superposant successivement (*fig.* 378) un disque de cuivre C, un disque de zinc Z, et une rondelle de drap D imprégnée d'eau acidulée; il répétait ensuite, un certain nombre de fois, la même succession, et terminait par un disque de zinc. Afin de mieux assurer le contact des métaux, et d'éviter l'oxydation des surfaces qui doivent se toucher, il soudait ensemble les disques de cuivre et de zinc contigus. Enfin la pile formée par la superposition de tous ces disques était maintenue entre des colonnes de verre, sur un pied de bois isolant; aux deux métaux extrêmes, étaient attachés des fils métalliques.

Dans la pile ainsi construite et isolée, le pôle négatif est au *cuivre* inférieur, et le pôle positif au *zinc* supérieur, comme on peut le constater

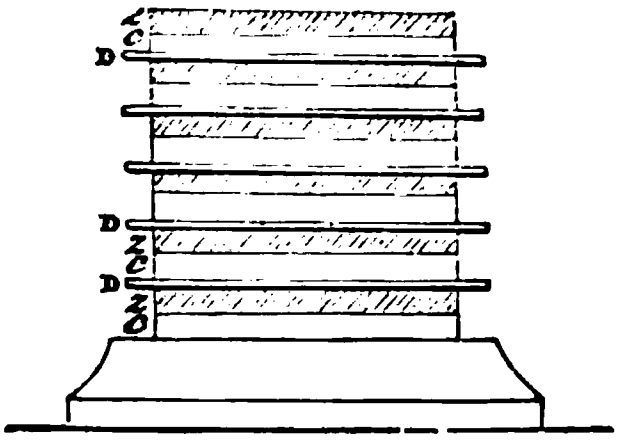


Fig. 378.

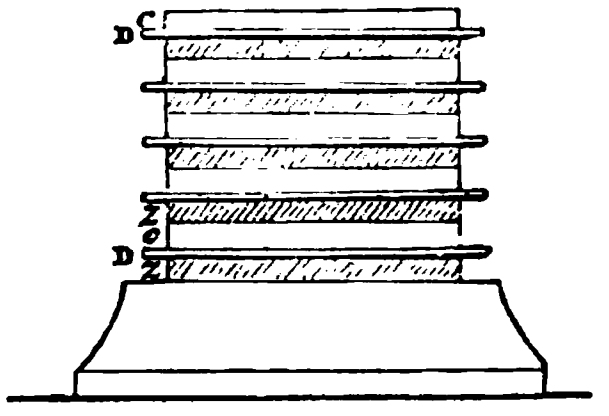


Fig. 379.

en faisant communiquer l'un de ces disques avec un électroscope. — Il est facile de voir qu'il n'y a, dans cette disposition des pôles, qu'une contradiction apparente avec le résultat indiqué plus haut (510) : en effet, l'électricité se produisant par l'action chimique de l'eau acidulée sur le zinc, le premier cuivre, soudé à la lame de zinc qui se charge d'électricité né-

gative, agit simplement comme un corps conducteur ; il pourrait être supprimé sans qu'il en résultât aucun changement. Il en est de même du dernier zinc : celui-ci, n'étant pas en contact avec l'eau acidulée, joue le rôle d'un conducteur, qui recueille l'électricité positive accumulée dans le cuivre. En d'autres termes, la pile représentée par la figure 379 fonctionne exactement *de la même manière*, et se charge *de la même quantité d'électricité* que la pile de la figure 378. Aussi construit-on maintenant, le plus souvent la pile de Volta (*fig.* 380), en supprimant les deux disques inutiles et ménageant, dans les lames terminales, un appendice muni d'une ouverture, pour y fixer les fils métalliques. La lame de zinc Z est le pôle négatif, la lame de cuivre C est le pôle positif.

515. **Modifications principales de la pile voltaïque.** — La *pile à auge* (*fig.* 381), dont l'invention est due à Cruikshank, n'est qu'une modification de la pile de Volta, dans laquelle les plaques métalliques sont verticales, et les rondelles de drap mouillé sont remplacées par de petites couches de liquide. — Elle se compose d'une série de plaques, formées chacune d'une lame de zinc et d'une lame de cuivre soudées : ces plaques sont placées à peu de distance les unes des autres, dans une auge à parois isolantes où l'on verse de l'eau aiguisée d'acide sulfurique ; aux extrémités, sont, d'une part une lame de zinc Z qui est le pôle négatif, d'autre part une lame de cuivre C qui est le pôle positif. — C'est avec une pile semblable, formée de deux cents auges et comprenant en tout deux mille couples, que furent faites en 1806, à l'Institut royal de Londres, les célèbres expériences de Davy, qui conduisirent à la découverte des métaux alcalins (524).

Fig. 380. — Pile à colonne, de Volta.

La *pile à tasses* (*fig.* 375), dont nous avons parlé plus haut, est plus longue à monter ; mais elle offre une marche plus régulière.

La *pile à hélice*, dont la figure 382 représente un élément, n'est autre qu'une pile à tasses, dans laquelle chaque lame de zinc Z, ainsi que cha-

que lame de cuivre C, a été enroulée en hélice, afin d'obtenir une surface plus considérable; les deux lames d'un même élément sont séparées

Fig. 381. — Pile à auge.

par des lanières de drap qui les empêchent de se toucher. — Le couple ainsi composé est plongé dans un seau de bois, contenant de l'acide sulfurique étendu d'eau ; les lames se continuent avec des rubans métalliques qui constituent les deux pôles. Pour former une pile, on réunit plusieurs éléments, comme il a été dit pour la pile à tasses. — Cette pile a été imaginée par Hare.

Fig. 382. — Élément de la pile en hélice.

Dans la *pile de Wollaston*, la lame de cuivre C de chaque élément (*fig.* 383) est repliée de manière à envelopper complétement la lame de zinc Z, et se trouve ainsi en présence de deux faces de celle-ci. Les deux lames sont séparées l'une de l'autre par deux petits morceaux de bois *l*, *l'*. — Pour former une pile de plusieurs couples (*fig.* 384), on joint encore le zinc de chaque élément au cuivre de l'élément suivant. Tous les éléments sont fixés d'ordinaire à une traverse de bois, mobile le long de deux montants M et M' ; cette disposition permet de les enlever à volonté des vases de verre contenant l'eau acidulée, ou de les y replacer.

La *pile de Münch* (*fig.* 385) se rapproche beaucoup, par sa construction, de la pile de Wollaston : on a soudé deux à deux des lames de zinc et des lames de cuivre, de manière à en former de doubles lames dont les deux feuillets présentent entre eux un certain écartement : deux séries de ces doubles lames M, M, M et M′, M′, M′, sont emboîtées l'une dans l'autre, comme l'indique la figure 386, de telle façon qu'une lame de zinc quelconque, *z*′ par exemple, soit toujours placée entre deux lames de cuivre non soudées à elle et appartenant, l'une à la même série, l'autre à la série opposée. La pile est terminée, d'un côté par un zinc libre Z, qui est placé

Fig. 383. — Élément de pile de Wollaston.

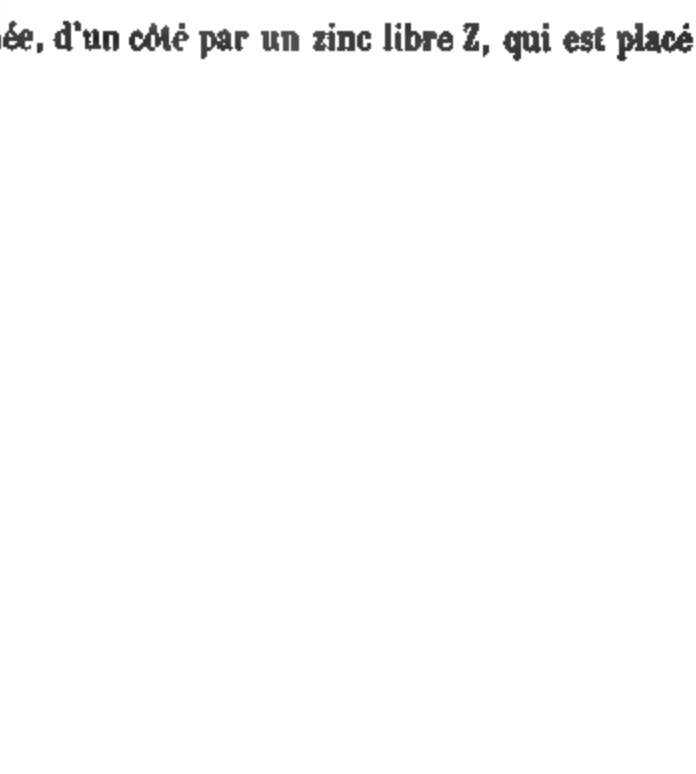


Fig. 384. — Pile Wollaston.

comme les autres lames de zinc et constitue le pôle négatif, de l'autre par un cuivre libre C, qui est placé comme les autres lames de cuivre et

constitue le pôle positif. — Toutes ces lames sont assujetties (*fig.* 385) dans des crans pratiqués pour le recevoir, sur des traverses de bois paral-

Fig. 385. — Pile de Münch.

lèles BB, et l'ensemble est supporté par des poignées P, P. Il suffit, pour mettre la pile en activité, de plonger les couples dans une auge

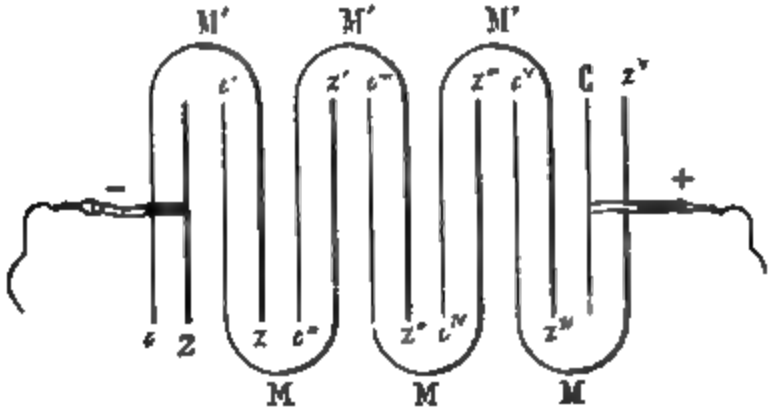


Fig. 386.

étroite VV, contenant de l'eau acidulée; lorsqu'on veut arrêter l'expérience, on peut de même enlever tous les couples à la fois. — Cette pile a l'avantage d'être peu volumineuse et d'un maniement facile : elle fournit des courants intenses, mais elle s'affaiblit rapidement.

516. **Emploi du zinc amalgamé pour la construction des piles.** — Lorsqu'on emploie du zinc du commerce pour construire l'une

des piles précédentes, et qu'on vient à *amalgamer* la surface du métal en la frottant avec du mercure, on constate que les lames ainsi préparées ne sont pas attaquées par l'acide sulfurique, tant que le circuit de la pile n'est pas fermé. Le métal et l'acide ne sont donc pas inutilement consommés : de là une économie qui serait, à elle seule, une raison déterminante pour avoir recours à ce procédé.

Mais, en outre, une fois l'action chimique déterminée par la fermeture du circuit, le phénomène offre une particularité nouvelle : l'hydrogène, au lieu d'apparaître simultanément sur le zinc et sur le cuivre, comme dans les piles construites avec du zinc ordinaire, apparaît exclusivement en bulles fines *sur le cuivre*. — L'observation montre que cette modification dans le phénomène coïncide avec un progrès sensible dans la constance du courant et dans son intensité. Nous accepterons ce résultat comme un fait, sauf à y revenir plus tard.

517. **Emploi des corps oxydants, ajoutés à l'acide sulfurique de la pile.** — Si l'on ajoute un peu d'acide azotique à l'acide sulfurique qui sert à charger l'une des piles précédentes, par exemple la pile à tasses ou la pile de Wollaston, et si l'on observe la marche de l'appareil, on constate qu'il ne s'y dégage plus *aucun gaz*, même sur la lame de cuivre. En même temps, on voit le liquide prendre une teinte d'un jaune verdâtre, et parfois émettre, au bout de quelque temps, des vapeurs rutilantes d'acide hypoazotique. L'acide azotique ajouté a donc pour effet d'absorber l'hydrogène qui tendait à se dégager : il lui cède une partie de son oxygène, pour reformer de l'eau, et donne naissance à de l'acide hypoazotique et à d'autres composés nitreux.

Or l'expérience a depuis longtemps montré que le courant d'une pile ainsi montée gagne encore beaucoup en constance et surtout en intensité. Nous accepterons encore ce résultat comme un fait, sur l'interprétation duquel nous reviendrons plus loin.

518. **Piles à courant constant et à deux liquides séparés.** — C'est en cherchant à faire disparaître, plus complétement encore, toutes les causes de variabilité des courants, qu'on a été conduit aux piles *à deux liquides séparés*. — Ces piles sont en très-grand nombre : nous n'indiquerons que celles qui sont le plus fréquemment employées.

519. **Pile de Daniell.** — C'est à Daniell qu'on doit d'avoir construit le premier, en 1836, un élément de pile conservant une constance presque absolue, pendant un temps très-long. La pile qu'il fit connaître alors est, aujourd'hui encore, celle qu'on emploie quand on veut obtenir des courants qui conservent très-longtemps la même intensité.

Nous décrirons le couple de Daniell sous sa forme la plus habituelle (*fig.* 587) : V est un vase de verre ou de faïence, contenant de l'acide sulfurique étendu d'eau ; Z est une lame de zinc amalgamé, repliée en forme de cylindre, qui plonge dans le liquide acide ; C est une lame de cuivre, également repliée en cylindre, mais au lieu de faire plonger di-

rectement cette lame dans l'acide sulfurique, on la place dans un vase de terre poreuse D, qui plonge lui-même dans le liquide acide, et qui contient une solution saturée de sulfate de cuivre. La paroi de ce vase D forme ainsi, entre les deux liquides, une cloison dans les vides de laquelle ils pénètrent, mais à travers laquelle ils ne se mélangent qu'avec une extrême difficulté. — Dans un semblable couple, on n'observe pas d'action chimique sensible tant que les lames de zinc et de cuivre ne communiquent pas entre elles; dès que cette communication est établie, le zinc est vivement attaqué, mais il ne s'opère aucun dégagement gazeux, ni sur cette lame, ni en aucun point du couple, et il se produit un courant dont l'intensité devient bientôt parfaitement constante. La lame de zinc est le pôle négatif, la lame de cuivre est le pôle positif.

Fig. 387. — Élément de pile de Daniell.

Examinons les actions qui s'établissent entre les divers corps qui sont en présence. — La lame de zinc amalgamé et le liquide acide faisant partie d'un circuit conducteur, l'eau est décomposée (521); son oxygène se porte sur le zinc et forme de l'oxyde de zinc qui se combine avec l'acide sulfurique, pour donner du sulfate de zinc. L'hydrogène que cette action met en liberté, aux points de contact du liquide acide avec la solution de sulfate de cuivre contenue dans le vase intérieur, agit à son tour sur le sulfate de cuivre, se substitue au métal de ce sel, et donne naissance à du cuivre métallique qui se dépose sur la lame de cuivre C. On voit donc que la présence de ce second liquide, le sulfate de cuivre, a pour résultat d'*empêcher tout dégagement gazeux* sur la lame de cuivre qui en est entourée.

Au point de vue de la constitution des liquides du couple, l'effet résultant est la transformation successive de l'acide sulfurique en sulfate de zinc, et la transformation inverse d'un même nombre d'équivalents de sulfate de cuivre en acide sulfurique et en eau. — L'affaiblissement graduel de la solution de sulfate de cuivre peut être évité, en ayant soin de maintenir toujours des cristaux de ce sel au contact du liquide, pour le saturer. On se borne quelquefois à placer ces cristaux dans le vase D; mais il est préférable, quand la pile doit fonctionner pendant plusieurs semaines de suite, d'en emplir un ballon de verre B (*fig.* 388), qu'on renverse dans le vase: on maintient ces cristaux en introduisant, dans le col du ballon, un bouchon percé d'un trou assez grand pour laisser facilement

arriver le liquide ; à mesure que celui-ci se sature, il descend au fond du vase et est sans cesse remplacé dans le ballon par les parties moins concentrées (*). — Quant à l'accroissement des proportions de sulfate de zinc à l'extérieur du vase D, comme la solution de ce sel gagne toujours le fond du liquide en vertu de sa grande densité, on peut ne pas s'en préoccuper, si la pile ne doit fonctionner qu'un temps peu considérable : lorsqu'elle doit rester très-longtemps montée, il devient nécessaire de soutirer le liquide, et de le remplacer par du liquide nouveau.

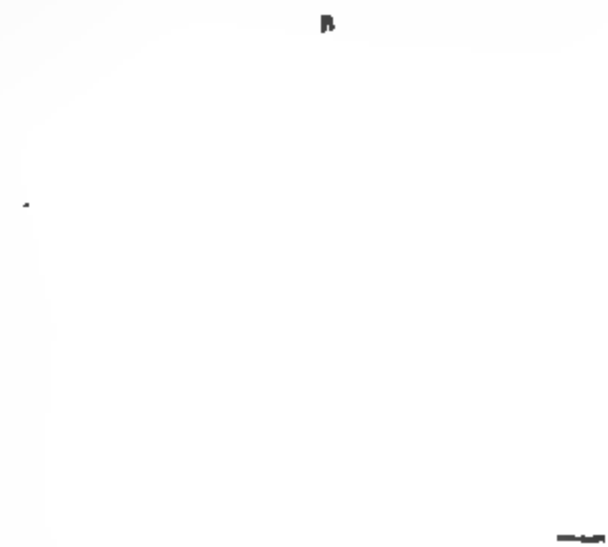


Fig. 388. — Élément de Daniell.

Pour former une pile avec plusieurs couples de Daniell, on réunit les éléments successifs (*fig.* 389), en joignant les rubans métalliques dont leurs pôles sont garnis, après s'être assuré que les surfaces de contact sont bien nettes, et on les maintient avec des vis de pression.

Fig. 389. — Pile de Daniell.

520. **Pile de Grove et pile de Bunsen.** — L'élément de la pile de Grove (*fig.* 390) et celui de la pile de Bunsen (*fig.* 391) présentent une disposition analogue à celle de l'élément de Daniell, dont ils ne diffèrent que par la nature du conducteur qui doit former le pôle positif, et par celle du liquide destiné à prévenir le dégagement d'hydrogène. — Le pôle négatif est encore une lame de zinc amalgamé Z, plongeant dans l'acide sulfurique étendu que contient le vase V ; au milieu de ce liquide est un vase de terre poreuse D, contenant de l'acide azotique dans lequel plonge le conducteur positif ; ce conducteur est une lame de platine P dans le couple de Grove ; c'est un cylindre de *charbon de cornue* C dans le couple de Bunsen (**).

(*) On substitue parfois, au cylindre de cuivre C de la figure 387, un simple fil de cuivre, comme le représente la figure 388.

(**) On nomme *charbon de cornue* une espèce de coke, qui se forme dans les cornues où l'on prépare le gaz d'éclairage par la distillation de la houille. Ce charbon est

Dès que le circuit est fermé, l'eau qui est en contact avec le zinc est décomposée, il se forme du sulfate de zinc : quant à l'hydrogène mis en liberté aux points de contact des deux liquides, il agit sur l'acide azotique auquel il enlève une partie de son oxygène pour reformer de l'eau. L'a-

Fig. 390. — Élément de pile de Grove. Fig. 391. — Élément de pile de Bunsen.

cide azotique est ainsi transformé en combinaisons d'oxygène et d'azote qui sont moins riches en oxygène, et dont la plus grande partie se dissout dans le liquide. — On évite donc encore, par cette disposition, les *dégagements gazeux*.

Il est bon de remarquer qu'on ne prend ici aucune précaution pour obvier à l'affaiblissement des liquides acides; et pourtant la pile de Bunsen conserve, pendant plusieurs heures, une intensité assez constante. De cette observation, il est permis de conclure que, dans les piles à un seul liquide, la cause *principale* de décroissance du courant réside bien moins dans les changements de concentration des liquides que dans les dégagements gazeux. — Ajoutons cependant que, pour la constance du courant, les piles de Grove et de Bunsen ne valent pas, à beaucoup près, celle de Daniell. on n'en fait jamais usage dans les cas où l'on a besoin de compter sur l'invariabilité du courant (*).

extrêmement dense ; il est conducteur de l'électricité, comme toutes les variétés de charbon qui ont été portées à de hautes températures. — La figure 391 montre le cylindre de charbon du couple de Bunsen assujetti dans un collier de cuivre K, qui sert à le faire communiquer avec le couple voisin. On couvre ce collier d une couche épaisse de mastic, pour le préserver de l'action des acides.

(*) Sous le rapport de l'intensité des courants, la pile de Bunsen est, au contraire, supérieure à celle de Daniell, et c'est à elle qu'on a recours, soit dans l'industrie, soit dans les laboratoires, pour obtenir les courants puissants. — Dans la plupart de ces cas, les petites variations qui se produisent dans son intensité n'ont que peu d'in-

II. — EFFETS CHIMIQUES DES COURANTS.

521. Décomposition de l'eau. — En 1800, Carlisle et Nicholson remarquèrent qu'il se dégage, au voisinage d'une pile a colonne en activité, une odeur semblable à celle que possède toujours l'hydrogène quand on le prépare en décomposant l'eau par le zinc et l'acide sulfurique. Ils furent ainsi conduits à expérimenter l'action d'un courant sur l'eau, et, en plongeant dans de l'eau les deux fils de laiton qui terminaient les pôles de la pile, ils virent se dégager de l'hydrogène au pôle négatif. Il ne parut point se produire de gaz au pôle positif, mais le fil s'oxyda rapidement. — Plus tard, en remplaçant les fils de laiton par des fils de platine, qui ne sont point oxydables, les mêmes expérimentateurs obtinrent de l'oxygène au pôle positif, en même temps que de l'hydrogène à l'autre pôle.

On effectue aujourd'hui de la manière suivante la décomposition de l'eau par la pile. — Un verre à pied V (*fig.* 392) est traversé, à sa partie inférieure, par deux fils de platine, assujettis et isolés dans une couche de résine ; les parties extérieures de ces fils viennent s'engager dans les petites colonnes métalliques P, P'. L'eau que contient le vase a été légèrement aiguisée d'acide sulfurique, et l'on a placé, sur les extrémités A et B des deux fils, de petites éprouvettes pleines d'eau, C, D. Dans les colonnes P et P', on fixe, au moyen de vis de pression, les fils métalliques qui terminent les pôles de la pile.— Dès que cette communication est établie, on voit se dégager de petites bulles gazeuses à la surface des fils A et B, et *seulement en ces points ;* si l'on arrête l'expérience à un moment quelconque, on peut constater que l'éprouvette C, qui correspond au pôle positif, contient de l'oxygène ; et que l'éprouvette D, qui correspond au pôle négatif, contient de l'hydrogène. Si l'on porte les éprouvettes gra-

Fig. 392. — Voltamètre.

convénients. Elle est d'ailleurs facile à construire et à entretenir, et peu coûteuse. Son principal inconvénient résulte des vapeurs nitreuses qu'elle dégage, et qui deviennent parfois intolérables quand on réunit un grand nombre d'éléments.

duées sur une cuve à eau, et qu'on les place de manière que le niveau du liquide, dans chacune d'elles, soit sur le même plan horizontal que le niveau du liquide extérieur (142), on constate que le volume de l'hydrogène est sensiblement double de celui de l'oxygène (*).

La valeur des volumes de gaz dégagés est d'autant plus grande que l'expérience a été plus longtemps prolongée; elle dépend aussi, toutes choses égales d'ailleurs, de la surface des éléments employés, de leur nombre, etc. Aussi verrons-nous bientôt que l'appareil permet d'obtenir une mesure de l'intensité du courant qui a traversé le liquide. — De là le nom de *voltamètre*, qui lui a été donné par Faraday.

522. **Définitions.** — L'oxygène qui provient de la décomposition de l'eau se porte toujours au pôle positif, et l'hydrogène au pôle négatif: les attractions électriques se produisant, en général, entre les corps chargés d'électricités contraires, on a été conduit à admettre que, au moment où les éléments de l'eau se séparent, les molécules d'oxygène sont chargées d'électricité négative; les molécules d'hydrogène, d'électricité positive. Or, un grand nombre de corps composés peuvent, comme on va le voir, subir une décomposition analogue à celle de l'eau ; on appelé corps *électro-négatifs* ceux qui se portent vers le pôle positif, corps *électro-positifs* ceux qui se portent vers le pôle négatif.

Toutefois, pour bien comprendre ces dénominations, il est essentiel de remarquer qu'un même corps peut, selon les cas, se rendre à l'un ou à l'autre pôle ; en d'autres termes, il peut se comporter comme électro-positif lorsqu'il est préalablement combiné avec tel corps particulier, et comme électro-négatif lorsqu'il est combiné avec tel autre. On ne doit donc pas appliquer à un corps, d'une manière absolue, l'une ou l'autre de ces deux dénominations : l'expérience apprend seulement lequel, de deux corps combinés, est électro-négatif *par rapport à l'autre*. On vient de voir, par exemple, que l'oxygène est électro-négatif par rapport à l'hydrogène.

523. — L'expérience précédente est une véritable *analyse* de l'eau, c'est-à-dire une séparation des éléments qui la constituent. Cette séparation s'effectue à la surface de contact du liquide et des fils métalliques, ou, en d'autres termes, dans les points mêmes par lesquels le courant pénètre dans l'eau ou en sort. — Faraday, qui a étudié ce genre d'analyse d'une manière toute spéciale, lui a donné le nom d'*électrolyse* (ἤλεκτρον électricité ; λύειν, décomposer) ; il nomme *électrodes* (ἤλεκτρον, *électricité* ; ὁδός, passage) les surfaces de contact où la décomposition s'effectue : l'*électrode positive* correspond au pôle positif, l'*électrode négative* au

(*) Lorsqu'on mesure avec précision le volume de chacun des deux gaz, on trouve le plus souvent une quantité d'oxygène un peu moindre que celle qui vient d'être indiquée; on constate alors qu'il s'est produit, au pôle positif, des traces appréciables d'*eau oxygénée*, formée par l'eau en présence de l'oxygène naissant. D'autre part, au bout de quelque temps, l'hydrogène est en partie absorbé au pôle négatif, à cause de la diffusion de l'eau oxygénée dans toute la masse liquide.

pôle négatif. La substance qui éprouve la décomposition est l'*électrolyte*. — Ces dénominations dispensent, dans un grand nombre de cas, des circonlocutions qu'il faudrait employer pour décrire les phénomènes.

524. **Décomposition des composés binaires en général.** — La plupart des composés dans lesquels la Chimie a reconnu l'existence de deux corps simples, et qu'on nomme *composés binaires*, peuvent être décomposés comme l'eau. La plus célèbre de ces décompositions est celle qui conduisit Davy à la découverte des métaux alcalins. Il plaça, entre les deux fils de platine qui terminaient les pôles d'une pile énergique, un fragment de potasse humide: il vit apparaître, au pôle négatif, des globules d'un métal brillant, qui brûlait presque instantanément avec de petites explosions ; au pôle positif, se dégageait de l'oxygène, qu'on put recueillir en opérant à vase clos. Le métal que Davy avait ainsi isolé, mais qui ne pouvait être conservé, ni à l'air, ni dans l'eau, à cause de son avidité pour l'oxygène, reçut le nom de potassium. — Le même physicien démontra que la soude est également formée par un métal, le sodium, uni à l'oxygène.

On emploie aujourd'hui, pour effectuer ces décompositions au moyen de la pile, le procédé suivant, qui est dû à Seebeck. — On pratique une cavité dans un morceau de potasse M (*fig.* 393), de manière à lui donner la forme d'une petite coupelle, qu'on place sur une lame de platine AB communiquant avec le pôle positif de la pile ; un globule de mercure N, placé dans la cavité, reçoit le fil qui vient du pôle négatif, en sorte que la surface inférieure du mercure est ici l'électrode négative. Le courant traverse la potasse, qu'on a eu soin d'humecter légèrement, et met en liberté du potassium à la surface de contact de la potasse et du mercure ; il se forme alors un amalgame, bien moins oxydable que le potassium lui-même. — Il suffit de distiller cet amalgame à l'abri de l'air, par exemple dans un courant d'hydrogène, pour vaporiser le mercure et mettre le potassium en liberté (*).

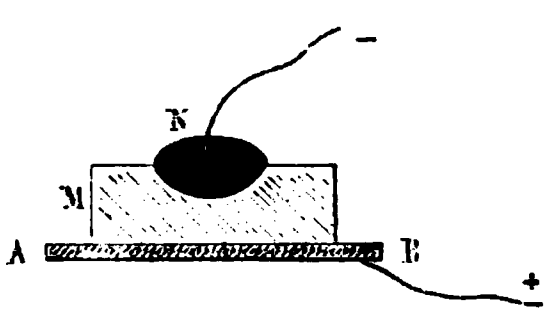


Fig. 393.

525. **Résultats fournis par la décomposition des composés binaires.** — Les composés binaires en général, oxydes basiques, oxydes acides, hydracides, chlorures, sulfures, etc., peuvent, dans la plupart

(*) Lorsqu'on fait la même expérience avec un morceau de sel ammoniac, on voit le mercure devenir pâteux et augmenter beaucoup de volume. — La ressemblance qu'offre cette expérience avec celle de la décomposition de la potasse et de la soude, et les analogies nombreuses qui rapprochent d'ailleurs les sels ammoniacaux des sels alcalins, ont déterminé Berzelius, et avec lui un grand nombre de chimistes, à admettre qu'il se forme alors un amalgame d'un *radical* qui serait analogue, par ses propriétés, aux métaux alcalins ; ce radical, qui est composé d'azote et d'hydrogène, et a reçu le nom d'*ammonium*, jouerait dans les réactions chimiques le rôle d'un corps simple métallique.

des cas, être soumis à une décomposition semblable, pourvu qu'ils soient assez conducteurs pour donner passage au courant. — Cette dernière condition n'est, le plus souvent, réalisée que si ces corps sont à l'état liquide. La plupart des oxydes et des chlorures métalliques sont solides à la température ordinaire, et mauvais conducteurs de l'électricité ; il faut alors, s'ils sont insolubles dans l'eau, les dissoudre dans l'ammoniaque ou les fondre par l'action de la chaleur, pour qu'ils puissent être décomposés par le courant.

Des résultats obtenus dans toutes ces expériences, on déduit les conclusions générales suivantes :

L'oxygène est électro-négatif par rapport à tous les autres corps simples connus, métalloïdes ou métaux.

Les métalloïdes sont eux-mêmes électro-négatifs par rapport à l'hydrogène et aux métaux.

Quant aux combinaisons binaires formées de deux métalloïdes autres que l'oxygène, c'est à l'expérience à apprendre quel est celui de leurs éléments qui est électro-négatif par rapport à l'autre.

526. **Décomposition des sels oxygénés.** — Lorsqu'on soumet à l'action d'un courant un sel oxygéné, en solution concentrée dans l'eau, il se décompose généralement de la manière suivante : *le métal* qui entrait dans la constitution de la base du sel *se dépose à la surface de l'électrode négative*, tandis que *l'oxygène de cette même base et l'acide tout entier sont mis en liberté à l'électrode positive.*

L'art de la *galvanoplastie*, sur lequel nous donnerons plus loin quelques détails, offre un exemple de ce genre d'action : une solution métallique concentrée, de sulfate de cuivre par exemple, étant soumise à l'action d'un courant, on voit le cuivre se déposer sur l'électrode négative. Si l'électrode positive est formée par un corps inattaquable, comme une lame de platine, on y observe un dégagement d'oxygène, et l'on peut constater la présence de l'acide dans le liquide environnant, au moyen du papier de tournesol.

527. **Théories de Grotthus et de Faraday, relatives à l'action qu'exerce le courant sur les substances soumises à l'électrolyse.** — Lorsqu'on décompose un liquide quelconque par le passage d'un courant, les produits de l'électrolyse se montrent *exclusivement à la surface des électrodes;* et, quelle que soit la distance de celles-ci, on n'aperçoit, dans l'intervalle qui les sépare, aucun indice de décomposition.

Grotthus a donné le premier, en 1806, une théorie qui permet de se rendre compte de ce résultat. Il admet que, dans la décomposition de l'eau, par exemple, chacun des pôles exerce sur l'un des éléments de ce corps une attraction spéciale, le pôle positif attirant vers lui l'oxygène de chacune des molécules, et le pôle négatif exerçant une attraction semblable sur l'hydrogène. De là résulte une orientation particulière de toutes les molécules liquides placées entre les deux pôles, lesquelles se dispo-

sent de façon à tourner leur oxygène vers le pôle positif P (*fig.* 394), et leur hydrogène vers le pôle négatif N. Alors l'attraction exercée par les pôles met en liberté la molécule d'oxygène la plus voisine du pôle positif : le départ de cette molécule rend libre une molécule d'hydrogène, qui se combine avec l'oxygène de la molécule d'eau voisine et met en liberté son hydrogène, et ainsi de proche en proche, jusqu'au pôle négatif où l'hydrogène devenu libre se dégage. Les molécules d'eau reformées s'orientent comme les molécules primitives, et les mêmes phénomènes se continuent indéfiniment.

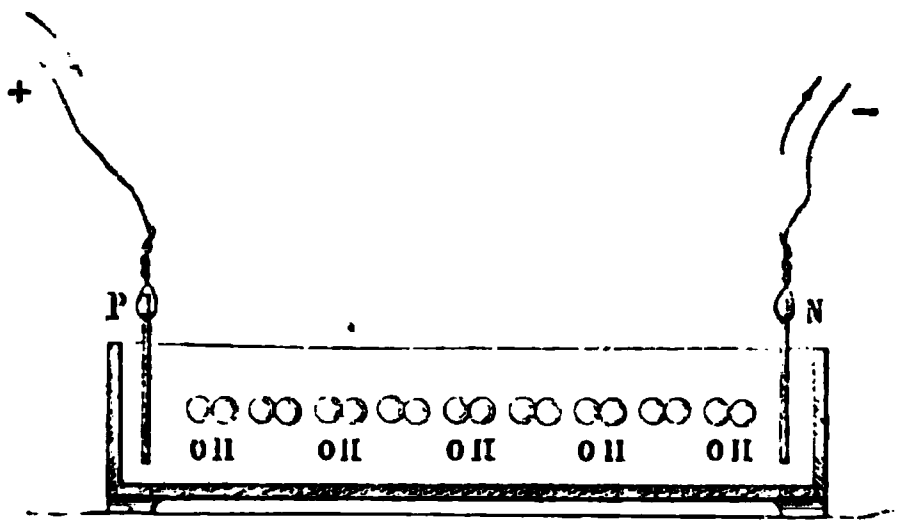


Fig. 394.

Telle que nous venons de l'exposer, la théorie de Grotthus présente des difficultés sérieuses, qui ont conduit Faraday à la modifier un peu. Dans les idées de ce physicien, c'est le passage du courant lui-même, et non l'attraction des pôles, qui détermine l'électrolyse; c'est le courant qui, en traversant l'eau, a pour effet de détruire, dans chaque molécule, l'affinité réciproque des éléments qui la constituent, et d'entraîner ces deux éléments en sens opposé, savoir l'hydrogène dans le sens du courant, et l'oxygène en sens contraire; l'hydrogène de chaque molécule et l'oxygène de la molécule voisine sont ainsi portés, pour ainsi dire, l'un vers l'autre, et il s'opère à la fois, dans tout l'intervalle des deux électrodes, un ensemble de décompositions et de recompositions immédiates. A chacun de ces échanges, il arrive que l'oxygène de la molécule avoisinant l'électrode positive est mis en liberté; il en est de même de l'hydrogène de la molécule qui touche l'électrode négative.

Cette théorie s'applique à la décomposition des composés binaires, en général, et à la décomposition des sels oxygénés. — Pour les composés binaires, elle est applicable sans modification, l'élément électro-négatif se comportant alors comme l'oxygène dans la décomposition de l'eau, et l'élément électro-positif comme l'hydrogène. — Quant aux sels oxygénés, il faut admettre que chacune de leurs molécules se sépare, pendant l'électrolyse, en deux parties, qui peuvent d'ailleurs être elles-mêmes formées de plusieurs corps simples : pour le sulfate de cuivre, par exemple, chaque molécule du sel donnera naissance, d'une part à du cuivre, d'autre part à de l'oxygène et à de l'acide sulfurique dont la réunion représente l'élément électro-négatif. Les échanges réciproques ayant lieu à la fois entre toutes les molécules voisines, pour ces éléments comme pour ceux de l'eau, on verra se déposer au pôle négatif du cuivre métallique, et

l'on observera au pôle positif un dégagement d'oxygène et d'acide sulfurique.

528. **Loi de Faraday.** — *Les actions chimiques produites dans les divers points d'un circuit sont équivalentes.* — On doit à Faraday la remarque suivante : si un voltamètre contenant de l'eau acidulée est placé sur le trajet d'un courant produit par une pile, et si l'on mesure la quantité d'eau décomposée *dans le voltamètre*, pendant un certain intervalle de temps, et la quantité d'eau décomposée en même temps *dans chaque élément de la pile*, on trouve que ces quantités sont rigoureusement égales. — Ces déterminations expérimentales peuvent se faire en mesurant, d'une part la quantité d'eau décomposée dans le voltamètre, au moyen des volumes des gaz provenant de cette décomposition ; d'autre part, la quantité d'eau décomposée dans chaque élément de la pile, au moyen du poids de zinc qui s'est dissous et dont chaque équivalent a pris à l'eau un équivalent d'oxygène.

De plus, si l'on interpose, en un point d'un circuit, un voltamètre à eau acidulée, et, en d'autres points du même circuit, des composés binaires contenant un équivalent de chacun des deux éléments constituants, ou des solutions salines neutres dont la base contienne un équivalent d'oxygène pour un équivalent de métal, on observe toujours que, pour chaque équivalent d'eau décomposé dans le voltamètre, il y a décomposition d'un équivalent de chaque composé binaire ou de chaque sel. — On peut donc dire que, en général, *dans tous les points d'un circuit*, aussi bien dans les éléments de la pile que dans les divers électrolytes qui sont soumis à son action, *il s'effectue des actions chimiques exactement correspondantes.*

529. **Effets secondaires.** — *Mode de décomposition des sels formés par les métaux alcalins.* — Nous avons eu égard exclusivement jusqu'ici aux effets de l'action directe du courant sur les corps soumis à l'électrolyse. Or il arrive, dans un grand nombre de cas, que les éléments mis en liberté réagissent les uns sur les autres, ou décomposent l'eau en présence de laquelle ils se trouvent : de là des *actions secondaires*, dont les résultats sont souvent les seuls observables.

Nous avons déjà vu, par exemple, que, dans la décomposition de la potasse par la pile, telle que l'effectua d'abord Davy, le potassium mis en liberté se combinait instantanément avec de l'oxygène, qu'il prenait soit à l'eau, soit à l'air. Si donc on fait passer un courant, non plus dans une solution d'un sel comme le sulfate de cuivre (526), mais dans une solution de sulfate de potasse, le potassium mis en liberté sur l'électrode négative doit décomposer l'eau, en lui enlevant de l'oxygène pour former de la potasse, et il doit se dégager de l'oxygène. — C'est, en effet, ce que montre l'expérience directe : dans un tube en forme d'U (*fig.* 395), on verse une solution aqueuse de sulfate de potasse, colorée avec du sirop de violettes : on a eu soin de placer préalablement, dans la partie courbe

N, une petite couche d'argile poreuse ou de sable, afin d'empêcher les liquides des branches A et B de se mélanger pendant l'expérience. Dans chacune de ces branches, on fait plonger une lame de platine, qu'on met en communication avec l'un des pôles de la pile ; on constate alors qu'il se produit à l'électrode positive A un dégagement d'oxygène, et que la teinture de violette est rougie, ce qui prouve la présence de l'acide sulfurique libre ; en même temps, il s'effectue à l'électrode négative B un dégagement d'hydrogène, et la teinture de violettes est verdie par la potasse. — D'après ce que nous avons déjà dit, ces résultats doivent être attribués : 1° à une *action directe* du courant sur le sel, action qui a mis en liberté, d'une part le potassium, de l'autre l'oxygène et l'acide ; 2° à une *action secondaire* du potassium sur l'eau, action qui a produit de la potasse et dégagé de l'hydrogène.

Fig. 395.

Fig. 396.

Si les choses se passent en effet de cette façon, il doit suffire, pour

supprimer l'action secondaire et obtenir le potassium lui-même à l'électrode négative, de placer à cette électrode du mercure qui puisse absorber le potassium, comme dans la méthode de Seebeck pour la décomposition de la potasse (524). — Or c'est ce que vérifie encore l'expérience : si l'on place la solution saline dans un vase V (*fig.* 396), et qu'on prenne, pour électrode négative, du mercure contenu dans un tube recourbé DB, le potassium s'amalgame à la surface B du mercure, et l'action secondaire est, en grande partie, supprimée (*).

530. **Influence de la nature des électrodes.** — C'est encore aux actions secondaires qu'il faut rapporter les phénomènes qu'on observe dans les cas où les électrodes elles-mêmes sont constituées par des métaux pouvant entrer en combinaison avec les produits de l'électrolyse. Nous nous contenterons d'en citer un seul exemple, qui trouvera encore son application dans la galvanoplastie :

Supposons que le corps soumis à l'électrolyse soit une solution concentrée de sulfate de cuivre, placée dans une cuve de verre A (*fig.* 403) ; prenons pour électrode positive une lame de cuivre P, et pour électrode négative un objet conducteur quelconque N. La décomposition du sel s'effectuant comme nous l'avons indiqué, il se dépose du cuivre en N ; *en* même temps il se produit en P, sur la lame de cuivre, des quantités d'oxygène et d'acide sulfurique qui correspondent au poids de métal déposé. La lame de cuivre est alors attaquée, et, au lieu d'un dégagement d'oxygène, il s'y produit une quantité de sulfate de cuivre dans laquelle intervient un poids de métal exactement égal à celui qui s'est déposé à l'électrode négative. La plaque P prend alors le nom d'*électrode soluble*. — On voit que cette action secondaire, exercée sur le métal qui constitue l'électrode positive, a pour résultat de maintenir toujours la liqueur au même état de concentration; en d'autres termes, tout se passe comme *si* le cuivre de cette électrode était simplement transporté sur l'électrode négative. — Nous indiquerons plusieurs exemples d'action semblables, en traitant de la dorure et de l'argenture par les procédés galvaniques.

III. — NOTIONS SUR LES INTENSITÉS DES COURANTS.

531. **Emploi du galvanomètre pour déterminer le sens et les intensités relatives des courants.** — On désigne sous le nom de

(*) Dans quelques cas particuliers, il arrive que l'oxygène, mis en liberté sur l'électrode positive et à l'état naissant, exerce une action secondaire sur les éléments du sel lui-même, et forme un oxyde métallique d'un ordre plus élevé que la base de ce sel. — Si, par exemple, on soumet à l'électrolyse un sel de protoxyde de plomb, l'acide du sel se montre encore à l'électrode positive, mais le dégagement d'oxygène en ces points est assez faible, et il s'y produit un dépôt de bioxyde de plomb. On voit d'ailleurs le plomb, qui est mis en liberté par l'action directe, se déposer en beaux cristaux sur l'électrode négative.

galvanomètre un instrument dont la description complète sera donnée plus loin (561, *fig.* 412), et qui est spécialement destiné à comparer le sens et les intensités relatives des courants. Il comprend, comme parties essentielles : 1° un cadre rectangulaire vertical en ivoire, sur lequel est enroulé un grand nombre de fois un fil métallique couvert de soie; 2° un système de deux aiguilles aimantées horizontales, fixées invariablement l'une à l'autre au moyen d'une petite tige de cuivre verticale M, suspendue elle-même à un fil de cocon GM (*fig.* 411). Pour mettre l'instrument en expérience, on oriente d'abord le cadre parallèlement au plan vertical dans lequel les aiguilles ont été amenées par l'action de la terre : on établit alors la communication des pôles de la pile avec les boutons métalliques C, C′ qui correspondent aux deux extrémités du fil de l'instrument, et l'on observe une déviation des aiguilles, déviation que l'on peut mesurer en observant la nouvelle position de l'aiguille supérieure sur le cadran S.

Or, si l'on fait passer le courant alternativement dans un sens et dans le sens contraire, en intervertissant les communications des pôles avec les extrémités du fil de l'instrument, on constate que les déviations de l'aiguille se produisent dans des sens opposés. — Donc, en général, le *sens de la déviation* permet de déterminer le *sens du courant* dans le fil du galvanomètre.

Quant aux intensités, on dit que deux courants ont des *intensités égales* lorsqu'ils produisent sur le même galvanomètre *la même déviation*. — Pour arriver maintenant à comparer des intensités différentes au moyen des déviations qui leur correspondent, supposons que le galvanomètre employé porte, par exemple, 100 tours de fil : faisons passer dans l'instrument le courant d'une pile déterminée, et observons la déviation *a*. Déroulons maintenant la moitié des tours de fil, c'est-à-dire 50 tours, en sorte que, sans cesser de faire partie du circuit, ils cessent d'agir sur les aiguilles; il n'y aura rien de changé dans le courant lui-même, mais l'action du cadre sur le système des aiguilles sera moitié moindre; observons la nouvelle déviation *b* : si le courant d'une autre source, en traversant le cadre avec ses 100 tours de fil, produit la déviation *b*, ce courant devra être considéré comme ayant une intensité *moitié moindre* que le premier. De même, si l'on détermine par expérience la déviation *c*, obtenue en faisant passer le courant primitif dans 25 tours du galvanomètre, et si un courant, en passant dans les 100 tours de fil, produit une déviation égale à *c*, ce courant devra être considéré comme ayant une intensité égale *au quart de celle du premier*; et ainsi de suite. On conçoit ainsi qu'il soit possible de construire, pour un galvanomètre déterminé, une table fournissant, en regard des différentes déviations, les rapports des intensités des courants qui les produisent. — Les physiciens emploient d'autres méthodes plus pratiques, pour la construction de ces tables : nous aurons l'occasion d'indiquer plus loin quelques-unes de ces méthodes.

Le galvanomètre convient exclusivement à la mesure de courants *peu énergiques*. Avec les courants intenses, les aiguilles sont toujours amenées dans une position sensiblement perpendiculaire au méridien magnétique. et, par suite, il n'est plus possible de déduire de ces déviations aucune mesure d'intensité. — On construit des instruments, fondés sur les mêmes principes que le galvanomètre, qui se prêtent d'une manière spéciale à la mesure des courants énergiques : ces instruments, désignés sous la dénomination générale de *rhéomètres*, ne peuvent être décrits ici.

532. **Mesure de l'intensité des courants par le voltamètre.** — Supposons qu'on ait déterminé les rapports des intensités d'un certain nombre de courants différents, soit au moyen du galvanomètre, soit au moyen d'un rhéomètre quelconque. Si chacun des circuits contient, en même temps que l'un de ces instruments, un voltamètre (*fig.* 392) chargé avec de l'eau acidulée, on peut comparer entre elles les quantités d'hydrogène dégagées, dans le même temps, par chacun des courants. Or l'expérience ainsi faite montre que les quantités d'hydrogène qui sont mises en liberté, dans le même temps, par chacun des courants, sont *proportionnelles aux intensités mesurées par le galvanomètre*. Le voltamètre peut donc aussi servir à la mesure des intensités, et il fournit, pour les mêmes courants, les mêmes rapports d'intensités que le galvanomètre (*).

533. **L'intensité d'un courant dépend de la résistance des conducteurs qu'il traverse.** — Si, dans un circuit parcouru par un courant, on introduit un fil métallique fin, on observe une diminution d'intensité; cette diminution est d'autant plus sensible que la longueur du fil est plus considérable. — De là on peut conclure qu'un semblable fil offre à la propagation de l'électricité une *résistance* ayant pour effet d'affaiblir le courant, résistance qui augmente avec la longueur du fil.

534. **Lois de Ohm, relatives à l'intensité des courants, dans le cas où la pile n'offre pas de résistance sensible.** — Choisissons comme source d'électricité une pile *formée uniquement de corps très-conducteurs*, comme les piles thermo-électriques qui seront décrites plus loin (chap. VII), et dans lesquelles n'entrent que des barreaux métalliques d'une section assez considérable, sans interposition de liquides, et réunissons les deux pôles de cette pile par un fil métallique fin : nous pourrons considérer la pile comme ayant uniquement pour rôle de donner naissance au courant, sans offrir elle-même de résistance sensible. — Les intensités différentes qu'offre alors le courant, quand on emploie successivement

(*) Remarquons toutefois que, si l'intensité d'un courant éprouve des variations dans l'intervalle de temps pendant lequel on recueille le gaz, on n'obtient, par ce procédé, qu'une valeur *moyenne* des intensités qui se sont succédées pendant cet intervalle. — Enfin, le voltamètre ne peut pas servir pour les courants d'une faible intensité, parce que ces courants ne décomposent pas l'eau.

divers fils, sont soumises à des lois très-simples, qui ont été formulées par Ohm, et vérifiées expérimentalement par Pouillet.

1° Supposons qu'on ait adapté au pôle de la pile une certaine longueur de fil, et qu'on ait mesuré l'intensité du courant, en enroulant le fil un certain nombre de fois sur le cadre d'un galvanomètre. Si l'on remplace ce fil par un autre, de même nature et de même section, mais de longueur double, et qu'on enroule ce nouveau fil le même nombre de fois sur le même galvanomètre, on constatera que l'intensité observée est égale à la moitié de la première. — En général, *les intensités du courant sont inversement proportionnelles aux longueurs du fil qu'il traverse.*

2° Si l'on substitue, à un premier fil de longueur déterminée, un autre fil ayant la même longueur et formé du même métal, mais d'une section double, on constate que l'intensité du courant devient double. — En général, les *intensités du courant sont directement proportionnelles aux sections transversales du fil qu'il traverse.*

3° Enfin, si l'on emploie successivement, avec une même pile, des fils de même longueur, de même section, mais de natures différentes, on constate que les intensités du courant sont variables avec la nature du fil. — Ces intensités peuvent être considérées comme proportionnelles à un coefficient particulier, qu'on appelle *coefficient de conductibilité électrique*, et qui est l'un des caractères physiques distinctifs du corps dont est formé le fil.

Les trois lois qui précèdent peuvent être comprises dans une formule très-simple. — Soit l et l' les longueurs de deux fils qu'on aura successivement employés pour fermer le circuit d'une même pile; soit s et s' leurs sections, c et c' leurs coefficients de conductibilité. D'après ce qu'on vient de voir, le rapport des intensités i et i' du courant, dans ces deux circonstances, est donné par la formule.

$$(1) \qquad \frac{i}{i'} = \frac{\left(\frac{cs}{l}\right)}{\left(\frac{c's'}{l'}\right)}$$

535. **Longueur réduite ou résistance d'un conducteur déterminé.** — La manière la plus simple de comparer entre eux les divers conducteurs, au point de vue de l'influence qu'ils exercent sur les intensités des courants, consiste à évaluer, pour chacun d'eux quelle serait la longueur d'un fil déterminé qui lui serait équivalente. On peut employer, par exemple, comme terme de comparaison, un fil de cuivre ayant 1 millimètre de diamètre : ce fil prend alors le nom de *fil normal*. — Le nombre qui représente la longueur du fil normal qui est équivalente à un conducteur déterminé est ce qu'on nomme la *longueur réduite* ou la *résistance* de ce conducteur.

La valeur numérique de la longueur réduite d'un conducteur se déter-

mine immédiatement, en s'appuyant sur la formule (1), quand on connaît les dimensions de ce conducteur et son coefficient de conductibilité. — En effet, soit l la longueur, s la section et c le coefficient de conductibilité du conducteur qui a donné, avec une pile déterminée, un courant ayant une intensité i. Soit λ sa longueur réduite, c'est-à-dire la longueur d'un second conducteur qui aurait pour section l'unité, dont le coefficient de conductibilité serait égal à l'unité, et qui serait équivalent au premier. Ce second conducteur donnant, avec la même pile, la même intensité au courant, la formule (1) devient alors, en faisant $i'=i$, $s'=1$, $c'=1$, et remplaçant l' par λ,

$$1=\frac{\left(\frac{cs}{l}\right)}{\left(\frac{1}{\lambda}\right)}$$

d'où l'on tire

$$\lambda=\frac{l}{cs}\ (*)$$

Il est particulièrement commode, dans les questions qui se rapportent aux intensités des courants, de représenter chaque conducteur par sa *longueur réduite*, car la comparaison de divers conducteurs se réduit alors à une comparaison de dimensions linéaires. — Considérons, par exemple, la formule (1), qui comprend les trois lois élémentaires de Ohm et désignons par λ et λ' les longueurs réduites des deux fils ; ces longueurs réduites ont pour expression $\lambda=\frac{l}{cs}$, $\lambda'=\frac{l'}{c's'}$; la formule (1) peut donc s'écrire

$$\frac{i}{i'}=\frac{\left(\frac{1}{\lambda}\right)}{\left(\frac{1}{\lambda'}\right)},$$

ou bien

$$(2)\qquad \frac{i}{i'}=\frac{\lambda'}{\lambda},$$

Ce qui se traduit par cet énoncé, d'une simplicité remarquable :

Les intensités des courants produits successivement par une même pile,

(*) Supposons, par exemple, qu'il s'agisse d'un fil d'or ayant 12 mètres de longueur et 3 millimètres de diamètre, et qu'on sache que le coefficient de conductibilité de l'or par rapport au cuivre est 0,7. Puisqu'on a pris pour unité de section la surface d'un cercle ayant pour diamètre 1 millimètre, la section actuelle, qui est un cercle ayant pour diamètre 3 millimètres, a pour mesure 3^2, ou 9. La longueur réduite de ce fil est donc $\frac{12}{0,7\times 9}$ ou $1^m,90$.

avec divers circuits homogènes, sont en raison inverse des longueurs réduites de ces circuits.

536. **Force électromotrice d'un élément de pile de résistance négligeable.** — Si l'on considère un élément de pile n'offrant pas de résistance sensible, et qu'on réunisse successivement ses deux pôles par des fils ayant pour longueurs réduites λ, λ', λ'', on aura, d'après la relation (2) que l'on vient d'obtenir,

$$i\lambda = i'\lambda' = i''\lambda'' = A,$$

la quantité A étant un nombre constant, qui caractérise évidemment l'élément employé, puisque sa valeur serait, en général, différente avec un autre élément de pile.

Cherchons maintenant quelle est la signification physique de cette quantité A. Puisqu'elle est définie par la relation $i\lambda = A$, si l'on employait pour réunir les deux pôles de cet élément, un fil ayant pour longueur réduite l'unité, on obtiendrait un courant dont l'intensité i_1 serait telle, que l'on eût $i_1 = A$; donc la constante A, qui prend le nom de *force électromotrice* de l'élément considéré, est *l'intensité du courant que produirait cet élément si la longueur réduite du circuit était égale à l'unité.*

On voit d'ailleurs que, en introduisant cette constante, les relations précédentes prennent alors la forme simple.

$$(3) \quad i = \frac{A}{\lambda},$$

c'est-à-dire que l'*intensité du courant produit par un élément de pile de résistance négligeable, dans un circuit homogène, est proportionnelle à la force électromotrice de l'élément, et en raison inverse de la longueur réduite du circuit.*

537. **Intensité du courant produit par un élément de pile, de résistance négligeable, dans un circuit formé de divers conducteurs successifs.** — Lorsque les deux pôles d'un élément de pile sont réunis par des conducteurs de nature et de dimensions diverses, et qu'on interpose des galvanomètres en différents points du circuit, on constate que ces instruments accusent tous *la même intensité* dans le courant qui les traverse, la valeur de cette intensité dépendant d'ailleurs de la résistance totale.

On est conduit alors, par analogie, à penser que l'intensité i du courant, dans ces conditions, doit être donnée par une relation semblable à celle qu'exprime la formule (3), en considérant la longueur réduite du circuit comme exprimée par la *somme des longueurs réduites* des divers conducteurs λ, λ', λ'',....; c'est-à-dire que l'on doit avoir

$$(4) \quad i = \frac{A}{\lambda + \lambda' + \lambda'' + \ldots\ldots} ;$$

c'est ce que l'expérience vérifie complétement.

538. **Influence de la résistance de l'élément lui-même sur l'intensité du courant.** — Le courant produit par un élément de pile dans un circuit fermé traverse l'élément lui-même, aussi bien que les conducteurs qui réunissent ses pôles. Dès lors, tout porte à penser que, dans la plupart des cas, l'élément doit offrir une résistance, qui influe sur l'intensité du courant au même titre que celle des conducteurs interpolaires, et qui peut s'exprimer, comme celle de chacun de ces conducteurs, par une certaine longueur de fil normal, c'est-à-dire par une *longueur réduite*. — C'est ce que l'expérience vérifie encore : si l'on désigne par L cette longueur réduite, que nous supposons maintenant assez grande pour n'être plus négligeable ; si, en outre, pour plus de simplicité, on désigne par une seule lettre λ la résistance de *tous les conducteurs* qui réunissent les pôles de l'élément, l'intensité du courant est

$$(5) \qquad i = \frac{A}{L+\lambda}$$

Quand on considère, en particulier, le courant produit par un élément *hydro-électrique* (*fig.* 397), c'est-à-dire par un élément du genre de ceux qui ont été étudiés au commencement de ce chapitre et qui contiennent des couches liquides plus ou moins considérables, il est indispensable de faire usage de cette dernière formule, et non pas de la formule (4). En effet, l'expérience montre que les liquides présentent des résistances qui, à dimensions égales, sont toujours *plusieurs millions de fois égales à celles des métaux* : en sorte que, bien que les couches liquides des éléments de piles aient généralement des sections assez grandes et des longueurs assez petites, le terme L est du même ordre de grandeur que la longueur réduite des conducteurs interpolaires et ne doit pas être négligé.

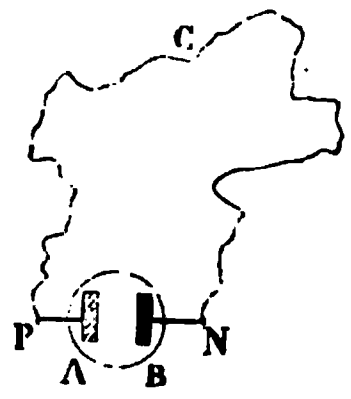


Fig. 397.

539. **Intensité du courant produit par une série de plusieurs éléments de nature quelconque, identiques entre eux.** — Lorsque, plusieurs éléments étant placés à la suite les uns des autres *en série* de manière à former une pile (*fig.* 398), on réunit les pôles N et P de cette

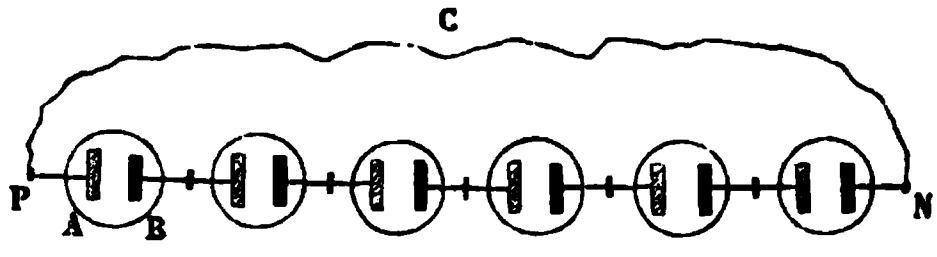


Fig. 398.

pile par un conducteur C, chaque élément intervient dans la production du courant qui parcourt le circuit. Nous examinerons seulement le cas

particulier, qui est d'ailleurs le plus fréquent, où tous les éléments de pile employés sont *identiques entre eux*.

Nous admettrons les deux principes suivants, dont les conséquences sont d'ailleurs vérifiées par l'expérience :

1° *Lorsque plusieurs éléments sont réunis de façon que le courant produit par l'un d'eux doive en traverser un certain nombre d'autres, l'intensité de ce courant partiel est modifiée par les résistances des autres éléments comme s'ils étaient inactifs.*

2° *L'intensité du courant produit dans le circuit est la somme algébrique des intensités partielles ainsi calculées.*

Dès lors, soit A la force électromotrice de l'un des éléments qui entrent dans le circuit, L sa longueur réduite, et λ la longueur réduite du conducteur C qui réunit les pôles de la pile ; soit n le nombre des éléments employés. — Le courant partiel, qui est produit par le premier élément, traverse un circuit qui est formé d'abord de cet élément lui-même, dont la longueur réduite est L, puis de $(n-1)$ éléments ayant une résistance totale exprimée par $(n-1)$ L, et enfin des conducteurs interpolaires dont la résistance est λ. On aura donc, pour l'intensité i de ce courant partiel, $i = \frac{A}{nL+\lambda}$. Mais chacun des éléments de la pile produit un courant partiel qui a cette même intensité i ; donc, d'après le second principe énoncé plus haut, l'intensité I du courant produit par l'ensemble de tous les éléments est égale à n fois l'intensité i, c'est-à-dire que l'on a

$$(6) \quad I = \frac{nA}{nL+\lambda}.$$

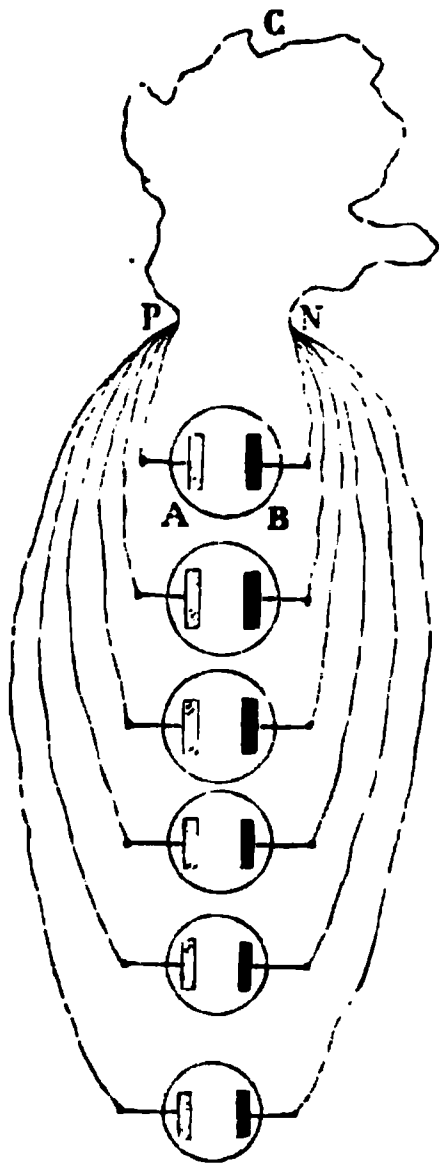


Fig. 399.

540. **Intensité du courant produit par plusieurs éléments identiques, réunis en batterie, ou formant un élément multiple.** — On dit que plusieurs éléments de pile sont associés *en batterie*, lorsque tous les pôles de même nom sont réunis entre eux (*fig.* 399), de sorte que le conducteur extérieur C unisse l'ensemble P de tous les pôles positifs à l'ensemble N de tous les pôles négatifs. — Si l'on considère un ensemble formé de n éléments ainsi associés, la théorie et l'expérience montrent qu'il se comporte, dans toutes les circonstances, comme *un seul élément* dont la résistance serait n fois moindre et dont la force électromotrice serait la même : de là le nom d'*élément multiple*, qu'on donne souvent à l'ensemble lui-même.

Dès lors, si A est la force électromotrice de l'un des éléments AB qui constituent l'élément multiple, et si L est sa longueur réduite, l'élément multiple donne, dans un conducteur de longueur réduite λ, la même intensité qu'un élément dont la longueur réduite serait $\frac{L}{n}$: si l'on désigne par J cette intensité, on a

$$(7) \qquad J = \frac{A}{\frac{L}{n} + \lambda}$$

541. Le mode d'association des éléments en série convient spécialement au cas où le conducteur interpolaire offre une résistance très-grande par rapport à celle des éléments. — Soit un conducteur dont la résistance λ soit très-grande par rapport à la résistance L de l'un des éléments de pile dont on fait usage.

Si l'on employait ce conducteur avec un seul élément de pile (*fig.* 397), on aurait une intensité du courant représentée par la relation (5) ; ou, *en* considérant L comme négligeable vis-à-vis de λ,

$$i = \frac{A}{\lambda}$$

Si maintenant on emploie n éléments associés en série, on devra, dans la formule (6), considérer le terme nL comme négligeable vis-à-vis de λ, ce qui donne sensiblement

$$I = \frac{nA}{\lambda},$$

si l'on associait les mêmes éléments en batterie, la formule (7) donnerait pour intensité

$$J = \frac{A}{\lambda}.$$

Donc, quand le conducteur offre une résistance considérable par rapport à celle des éléments, l'intensité I est sensiblement *proportionnelle au nombre des éléments;* tandis que l'intensité J est simplement égale, à peu près, à celle que donnerait *un seul élément.* — C'est donc l'association *en série* qui convient spécialement à ce cas, et il y a avantage, si l'on veut un courant d'une grande intensité, à employer un grand nombre de couples.

Ainsi, par exemple, c'est toujours en série qu'on associe les couples thermo-électriques, lorsque les courants qu'ils produisent doivent traverser des fils métalliques fins, incomparablement plus résistants que les couples eux-mêmes. — Nous citerons plus loin plusieurs exemples, dans lesquels ce mode d'association doit être également employé pour les piles hydro-électriques,

542. Le mode d'association des éléments en batterie convient spécialement au cas où le conducteur interpolaire a une résistance très-petite par rapport à celle des éléments. — Soit maintenant un conducteur dont la résistance λ soit très-petite par rapport à L. En considérant λ comme négligeable dans les formules (6) et (7), on aura, pour intensité du courant donné par n éléments associés en série, $I = \frac{nA}{nL}$, ou simplement

$$I = \frac{A}{L},$$

et, pour intensité du courant donné par les mêmes éléments associés en batterie, $J = \frac{A}{\left(\frac{L}{n}\right)}$, ou bien

$$J = \frac{nA}{L}.$$

Donc, quand le conducteur offre une résistance négligeable par rapport à celle des éléments, l'intensité I est simplement égale à celle d'*un seul élement;* tandis que l'intensité J est sensiblement *proportionnelle au nombre des éléments.* — C'est donc l'association *en batterie* qui convient spécialement à ce cas, et il y a avantage, pour avoir un courant très-intense, à employer un nombre de couples aussi grand que possible.

On verra plus loin, par exemple, que si l'on veut faire rougir des fils métalliques assez gros et assez courts, en y faisant passer des courants produits par des piles hydro-électriques, il y a avantage à associer les couples en batterie, ou, ce qui revient au même, à faire usage de couples offrant une surface très-considérable.

543. Des divers autres modes d'association des éléments de piles. — Entre les deux cas extrêmes que nous venons d'examiner, il se présente, dans la pratique, des cas intermédiaires, où la résistance du conducteur extérieur à la pile est comparable à celle d'un ou plusieurs couples. La théorie indique qu'il faut alors grouper les couples en un certain nombre de séries, et réunir en batterie ces séries successives; elle démontre également que, pour obtenir, avec un nombre donné de couples et dans un circuit donné, la plus grande intensité du courant, il faut adopter *une disposition telle, que la résistance de la pile elle-même se rapproche le plus possible de la résistance de la portion extérieure du circuit.*

Il est d'ailleurs toujours facile, dans ce cas, de trouver par tâtonnements, sans calcul, quel est l'arrangement qui donne au courant l'intensité maximum. Si l'on a, par exemple, six éléments, on pourra les réunir

ou en deux séries formées chacune de trois éléments (*fig.* 400), ou en trois séries formées chacune de deux éléments (*fig.* 401) ; l'un ou l'autre

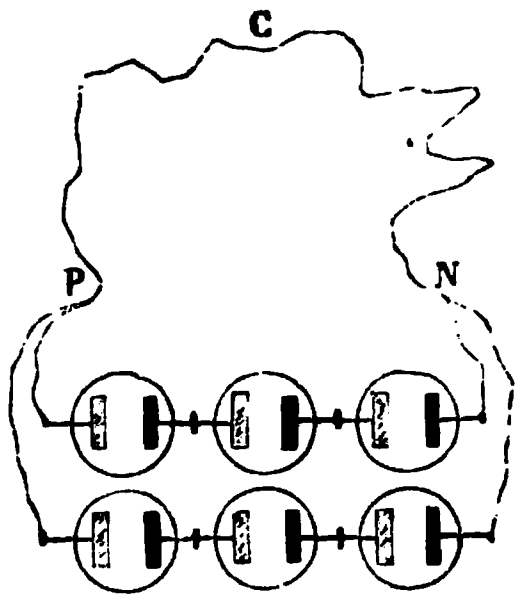


Fig. 400.

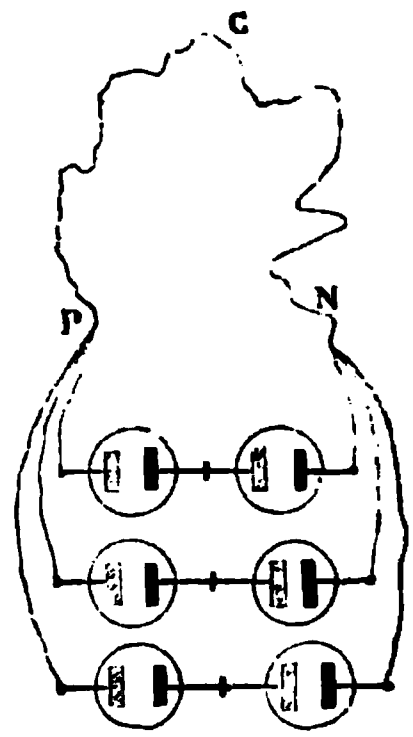


Fig. 401.

arrangement devra être préféré, selon la résistance du conducteur C qui est extérieur à la pile.

IV. — PHÉNOMÈNES DE POLARISATION. — INTERVENTION DE CES PHÉNOMÈNES DANS LES PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

544. Phénomènes de polarisation : leur influence sur l'intensité des courants. — Lorsqu'on fait passer un courant dans un corps qui puisse être décomposé par lui, et qu'on emploie, comme électrodes, des corps *inattaquables par les produits de la décomposition*, on observe bientôt une diminution notable dans l'intensité de ce courant.

Pour constater le phénomène, et en concevoir la cause, on peut disposer l'expérience de la manière suivante : après avoir chargé un voltamètre avec de l'eau acidulée, on le met en communication avec une pile, et l'on interpose un galvanomètre dans le circuit : dès que la décomposition a marché pendant quelques instants, on voit diminuer notablement la déviation de l'aiguille du galvanomètre. — Si l'on supprime alors la pile, et qu'on la remplace par un fil métallique, de manière à former un nouveau circuit, l'aiguille du galvanomètre est déviée en sens contraire de sa déviation primitive : de là on peut conclure qu'il se produit, après la suppression de la pile et au moment où l'on ferme le nouveau circuit, un courant *dont le sens est contraire à celui du courant primitif.*

Ce courant a reçu le nom de *courant secondaire :* il a une intensité moindre que le courant primitif, et l'on voit que, pour expliquer l'affaiblissement graduel qu'on avait observé dans le courant de la pile, il

suffit d'admettre que le courant secondaire existait avec celui de la pile elle-même, et que les deux actions contraires se neutralisaient en partie sur le galvanomètre. — Lorsque les électrodes sont amenées à cet état particulier où elles peuvent produire un courant secondaire, on dit qu'elles sont *polarisées*.

Quant à la cause qui produit le courant secondaire, dans l'exemple précédent, c'est évidemment la présence de l'oxygène et de l'hydrogène autour des deux fils de platine : en effet, on peut reproduire un courant semblable avec deux fils n'ayant servi à aucune décomposition électrolytique, et plongés, l'un dans une éprouvette contenant de l'oxygène, l'autre dans une éprouvette contenant de l'hydrogène. Dès que le circuit est fermé, on voit d'ailleurs les volumes des deux gaz diminuer, dans le rapport de deux volumes d'hydrogène pour un d'oxygène : il est donc manifeste qu'ils se combinent pour former de l'eau — Enfin, l'expérience montre même que deux lames de platine, maintenues pendant quelques instants, l'une dans l'oxygène, l'autre dans l'hydrogène, ont encore la propriété, quand on vient à les en retirer et à les plonger dans l'eau pure, de produire un courant semblable aux courants secondaires que nous avons signalés (*).

Les phénomènes que nous venons d'indiquer ne sont pas particuliers à l'électrolyse de l'eau. Lorsqu'on emploie, pour décomposer le sulfate de potasse, des électrodes de platine, on voit encore le courant s'affaiblir progressivement, et l'on peut constater la production d'un courant secondaire, en opérant comme nous l'avons dit. — On produit encore un courant semblable en plongeant une lame de platine dans un acide, une autre dans une solution alcaline, les plaçant ensuite dans l'eau pure, et les réunissant de manière à fermer le circuit.

545. **Interprétation des différences signalées, sous le rapport de la constance, entre les diverses piles hydro-électriques.** — Il nous est maintenant facile de nous rendre compte de l'efficacité des procédés employés pour diminuer la variabilité dans les piles hydro-électriques :

1° *Avantages du zinc amalgamé.* — Nous avons vu que, si l'on emploie du zinc *amalgamé* dans la construction de l'une quelconque des modifications de la pile de Volta, ce métal n'est pas attaqué tant que le circuit n'est pas fermé, et que, au moment de la fermeture du circuit, l'hydrogène apparaît en bulles fines, exclusivement sur le cuivre. M. de la Rive a

(*) Le courant produit dans des fils de platine qui plongent au milieu d'éprouvettes contenant de l'hydrogène et de l'oxygène, est assez intense pour qu'on soit parvenu, en réunissant un certain nombre de couples semblables, à former des piles capables de produire des étincelles, de décomposer l'eau, etc. — C'est ainsi qu'est construite la pile à *couples gazeux* de M. Grove, dans laquelle on peut du reste substituer, à l'hydrogène et à l'oxygène, divers autres gaz ; M. Grove a fait de ce genre d'actions une étude spéciale, au point de vue du sens et de l'intensité des courants qu'elles déterminent.

montré que la même propriété appartient au zinc *parfaitement pur* (*). — Or, en analysant le zinc du commerce, on constate qu'il est allié à plusieurs métaux étrangers, et que les diverses régions d'une même plaque sont très-différentes les unes des autres sous ce rapport. On conçoit donc que ces métaux forment, dans les divers points d'une lame, des couples dont le circuit est toujours fermé, et qui, par suite, peuvent toujours décomposer l'eau, dès que la lame y est plongée. De là, même après la fermeture du circuit de la pile, des courants, qui circulent seulement dans les parties hétérogènes de la lame, et qui sont perdus au point de vue de l'intensité du courant interpolaire; de là aussi un dégagement d'hydrogène sur les métaux alliés au zinc et moins attaquables que lui. L'emploi du zinc du commerce a donc deux inconvénients : 1° une partie de l'action chimique est perdue pour le courant interpolaire; 2° les bulles de gaz, qui augmentent la résistance du circuit et qui se dégagent irrégulièrement sur le zinc, rendent le courant variable et moins intense. — Ces inconvénients disparaissent lorsqu'on emploie du zinc amalgamé, plus homogène à sa surface que le zinc ordinaire.

2° *Avantages de l'acide azotique, ajouté à l'acide sulfurique de la pile.* — Dans la pile montée avec de l'acide sulfurique seul, l'hydrogène qui se porte sur le cuivre produit un courant de polarisation (544) de sens contraire au courant principal, en sorte que l'intensité du courant dans le circuit doit aller sans cesse en décroissant. — Il est facile de comprendre que l'addition de l'acide azotique, en supprimant ce dégagement gazeux (547), ait pour effet d'accroître l'intensité du courant.

3° *Causes de supériorité des piles à deux liquides qui ont été étudiées précédemment.* — Dans les piles à deux liquides qui ont été décrites plus

(*) L'expérience de M. de la Rive est très-simple, et facile à reproduire :

On plonge dans un vase V, contenant de l'eau acidulée (*fig.* 402), une lame de zinc *parfaitement pur :* on n'observe qu'une action chimique à peu près insensible, et un dégagement d'hydrogène à peine appréciable Lorsqu'on plonge dans le même liquide un fil conducteur quelconque, par exemple un fil de platine, l'action est encore nulle tant qu'il n'y a pas contact entre les deux métaux : mais si l'on vient à fermer le circuit, en touchant la lame de zinc Z avec le fil de platine P, comme le représente la figure 402, on voit l'action chimique devenir très-intense, et l'hydrogène se dégager en petites bulles, *uniquement sur le platine.*

L'expérience réussit de la même manière avec un métal autre que le zinc, et avec un liquide autre que l'acide sulfurique. Si le métal est parfaitement pur, le liquide, bien que capable d'agir sur lui pour former un sel, n'exerce pas d'action tant que le circuit n'est pas fermé par un corps conducteur non attaquable par le liquide, ou moins attaquable que le premier au contraire, l'action commence dès que le circuit est fermé, et les corps résultant de la décomposition du liquide se dégagent exclusivement à la surface du conducteur auxiliaire.

Fig. 402.

haut (519 et 520), les divers avantages que nous venons d'indiquer se trouvent réunis.

Dans la pile de Daniell, le zinc est amalgamé, de sorte qu'il ne se produit pas d'hydrogène sur ce métal; en outre, la présence du sulfate de cuivre dans le vase poreux empêche le dégagement d'hydrogène sur le cuivre.

Dans la pile de Grove ou dans celle de Bunsen, il ne se produit non plus aucun dégagement de gaz, ni sur le zinc, ni dans le vase poreux, pourvu que la pile n'ait pas fonctionné pendant un temps trop considérable. — Au bout d'un temps assez long, l'acide azotique venant à s'épuiser, on voit se dégager des bulles d'hydrogène sur la lame de platine ou sur le cylindre de charbon, et avec ce dégagement gazeux apparaissent les principales causes d'affaiblissement du courant. — On comprend ainsi comment ces dernières piles, quoique plus intenses que celle de Daniell, ne peuvent être employées quand on a besoin d'un courant dont la constance se conserve pendant un temps considérable.

V. — GALVANOPLASTIE. — DORURE, ARGENTURE ET CUIVRAGE GALVANIQUES.

546. **Galvanoplastie.** — On donne le nom de *galvanoplastie* à l'art de modeler les métaux, en les précipitant de leurs solutions salines par l'action du courant électrique. — Les principes en ont été posés, en 1838, par M. Jacobi en Russie, et, à peu près en même temps, par M. Spencer, en Angleterre.

Supposons qu'il s'agisse de reproduire, par voie galvanique, l'une des faces d'une médaille. — On commence par en prendre l'*empreinte*, soit avec du plâtre, soit avec de la cire, ou, mieux encore, avec de la *gutta-percha*, qui a la propriété de se ramollir sous l'action d'une douce chaleur, et qui reprend, à la température ordinaire, une dureté comparable à celle d'un cuir résistant. Cette empreinte est *inverse*, c'est-à-dire qu'elle donne en creux les reliefs de la médaille, et réciproquement; on conçoit donc que, si l'on parvient à y déposer une couche de cuivre, se moulant exactement sur sa surface, cette couche, détachée de l'empreinte, sera la reproduction *directe* de la médaille. — Pour obtenir le dépôt de cuivre, on emploie le procédé qui a été décrit plus haut (530). La cuve A (*fig.* 403) contient une solution saturée de sulfate de cuivre; l'empreinte de la médaille, préalablement couverte de plombagine, de manière à rendre conducteurs tous les points de la surface qui doivent recevoir le dépôt, est placée en N à l'extrémité d'un fil communiquant avec le pôle négatif d'un élément de Bunsen. L'électrode positive est formée par une lame de cuivre rouge: c'est une *électrode soluble*, abandonnant successivement au liquide une quantité de métal égale à celle qui se dépose sur l'autre élec-

trode. — On interrompt le courant lorsque la couche de cuivre a atteint une épaisseur suffisante, et on la détache de l'empreinte (*).

Fig. 403.

La figure 404 représente un appareil qui peut servir à reproduire galvaniquement plusieurs objets à la fois. La cuve AA contient une solution de sulfate de cuivre; on suspend à la tringle métallique T, qui commu-

Fig. 404. — Cuve Galvanoplastique.

nique avec le pôle positif, une ou plusieurs lames de cuivre; parallèlement à ces lames, on suspend aux tringles S et S', qui communiquent avec le pôle négatif, les empreintes à recouvrir. On a soin de placer ces

(*) Il est important de n'employer que des courants dont l'intensité ne soit pas trop considérable. — Si le courant est trop intense, le cuivre déposé est cassant; avec un courant plus fort encore, le dépôt est grenu ou pulvérulent. — On recommande d'ailleurs d'ajouter à la liqueur une petite quantité d'acide sulfurique, afin de la rendre plus conductrice ; le cuivre est alors plus flexible et d'un grain plus fin.

empreintes de manière que les surfaces sur lesquelles doit se former le dépôt soient tournées du côté des lames de cuivre.

547. **Appareil simple.** — On emploie quelquefois, pour la galvanoplastie, une autre disposition dans laquelle on n'a point à faire intervenir de pile extérieure au bain de sulfate de cuivre.

Au centre de la cuve AA (*fig.* 405), on place un ou plusieurs vases poreux, semblables à ceux des piles de Daniell; dans chacun de ces vases,

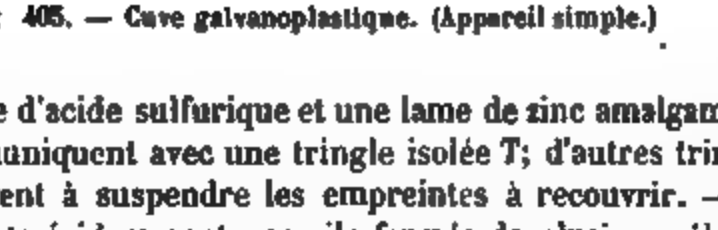


Fig. 405. — Cuve galvanoplastique. (Appareil simple.)

de l'eau aiguisée d'acide sulfurique et une lame de zinc amalgamé. Toutes les lames communiquent avec une tringle isolée T; d'autres tringles isolées, S, S', servent à suspendre les empreintes à recouvrir. — Cet ensemble représente évidemment une pile formée de plusieurs éléments de Daniell, dont les lames de cuivre auraient été remplacées par les empreintes conductrices; dès que l'on fait communiquer la tringle T avec les tringles S, S', le sulfate de cuivre est décomposé, et un dépôt de cuivre se produit sur chacune des empreintes. L'appareil est connu sous le nom d'*appareil simple*.

Cette méthode a l'avantage de ne point exiger de pile spéciale; mais elle présente un inconvénient, résultant de ce que le cuivre précipité n'est pas remplacé dans la liqueur, en sorte que celle-ci devient de plus en plus acide. Il faut, au bout d'un certain temps, neutraliser la solution par l'addition de craie pulvérisée, et la filtrer ensuite. — Dans la figure ci-contre, D et D' sont deux petits sacs de toile, contenant des cristaux de sulfate de cuivre.

548. **Applications industrielles de la galvanoplastie.** — Les procédés que nous venons de décrire permettent de reproduire en cuivre, non-seulement des médailles, mais des bas-reliefs, des planches gravées, des statues et des objets de formes quelconques.

L'art de la typographie en a fait d'intéressantes applications. On sait qu'une planche gravée, de bois, de cuivre ou d'acier, s'use assez rapidement lorsqu'on la fait servir à tirer un grand nombre d'épreuves. Au lieu

d'employer la planche elle-même pour le tirage, on emploie des reproductions galvaniques, qui ont exactement les mêmes qualités et que l'on peut renouveler indéfiniment pour le tirage. — C'est ainsi encore que, pour le tirage des *timbres-poste*, on fait d'abord un grand nombre de reproductions galvaniques du modèle unique qui a été façonné par le graveur; on compose ensuite une planche avec tous ces clichés, et l'on obtient, au tirage, des feuilles sur lesquelles tous les timbres sont rigoureusement semblables.

Les perfectionnements apportés successivement à la pratique industrielle de la galvanoplastie ont permis d'obtenir ainsi des objets présentant des dimensions énormes, comme les panneaux des portes de l'église Saint-Augustin, un grand nombre des ornements du nouveau bâtiment de l'Opéra de Paris, des statues de plusieurs mètres de hauteur, les bas-reliefs de la colonne Trajane, etc.

549. **Dorure et argenture galvaniques.** — C'est à M. de la Rive qu'appartient l'idée de recourir à l'électricité pour dorer ou argenter les métaux; cette méthode présente, pour la dorure en particulier, l'avantage de ne point exposer les ouvriers aux vapeurs qui se dégageaient dans les procédés de *dorure au mercure*, et dont l'absorption donnait lieu, presque infailliblement, aux accidents les plus funestes. — Les procédés pratiques qui sont aujourd'hui employés sont dus à MM. Henri Elkington et Georges-Richard Elkington : l'idée qui a permis de les introduire utilement dans l'industrie consiste essentiellement dans la substitution du cyanure alcalin d'or et de potassium, ou du cyanure d'argent et de potassium, aux sels acides qui attaquaient toujours la surface du métal sous-jacent et ne donnaient jamais une adhérence suffisante.

On emploie un seul et même procédé, soit pour l'argenture, soit pour la dorure, avec cette seule différence que l'argenture se fait à froid, tandis que la dorure exige une température d'environ 70°. — Supposons que la cuve A de l'appareil représenté par la figure 403 contienne une solution de cyanure double d'argent et de potassium; que la lame P soit une lame d'argent et que N soit un objet métallique, une médaille de cuivre par exemple. Si P communique avec le pôle positif, N avec le pôle négatif de la pile, le sel d'argent sera décomposé et il se déposera de l'argent sur la médaille; en même temps, l'électrode positive, si c'est une *électrode soluble*, restituera à la liqueur le métal qu'elle aura perdu (*).

(*) Les objets qui sont destinés à être argentés ou dorés, dans l'industrie, sont le plus souvent en laiton ou en maillechort. — Pour que le dépôt adhère à leur surface, il faut que cette surface soit parfaitement débarrassée de toute matière étrangère : c'est à quoi l'on arrive par le *dérochage* et le *décapage*. On chauffe ces objets, pour détruire les matières grasses dont ils peuvent être souillés ; ils se couvrent alors d'une légère couche d'oxyde; on les plonge, encore chauds, dans de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, qui enlève l'oxyde noir et ne laisse à la surface qu'un peu d'oxyde rouge, puis on lave à grande eau. La pièce ainsi *dérochée* est ensuite plongée dans l'acide

La figure 404 donne une idée de la disposition des appareils qu'on emploie pour argenter un grand nombre de pièces à la fois, dans l'industrie.

550. **Cuivrage galvanique.** — Le cuivre, que l'on emploie comme un métal vulgaire pour le couvrir d'or ou d'argent, présente à son tour, par rapport à la fonte de fer ou à la tôle, une supériorité très-grande, au point de vue de la résistance aux agents atmosphériques. Il n'est pas inaltérable à l'air, comme l'or; mais l'altération qu'il éprouve ne se propage pas dans les couches profondes avec cette rapidité qui convertit si promptement le fer en rouille; enfin, la teinte verdâtre qu'il prend à la surface ajoute même, aux œuvres artistiques façonnées avec le bronze de cuivre, un aspect recherché des amateurs. D'autre part, le cuivre coûte beaucoup plus cher que la fonte de fer, en sorte qu'il constitue, par rapport au fer, un métal précieux. — On conçoit donc que l'on ait dû chercher à cuivrer le fer, pour des raisons analogues à celles qui avaient fait chercher à argenter ou à dorer le cuivre.

Le bain de sulfate de cuivre qui sert à la galvanoplastie s'offrait naturellement, comme le sel de cuivre le plus commun dans l'industrie; mais il présente cet inconvénient que, étant toujours acide, il commence par attaquer la fonte de fer, et empêche ainsi l'adhérence que le métal déposé doit offrir avec elle. — Cette difficulté a été résolue par M. Oudry. On couvre d'abord les objets en fonte d'un enduit particulier, qui rend la fonte inattaquable aux acides : cet enduit est ensuite recouvert de plombagine, et la pièce ainsi préparée est installée entre des vases poreux, au milieu d'un bain de sulfate de cuivre, où elle fait partie d'un appareil simple (547). Avec des précautions spéciales, que l'usage a indiquées, le dépôt de cuivre est aussi adhérent que la pratique l'exige.

C'est ainsi, par exemple, qu'ont été revêtues les grandes statues de la fontaine de la place Louvois, à Paris; celles des fontaines de la place de la Concorde, ainsi que les vingt colonnes rostrales qui ornent cette place; c'est ainsi encore qu'ont été cuivrés les candélabres qui servent pour l'éclairage au gaz, dans la ville de Paris et dans plusieurs autres grandes villes. — Enfin le même procédé a pu être employé pour couvrir de cuivre les plaques de blindage des navires cuirassés, ainsi que les clous et les énormes vis qui servent à les assujettir.

nitrique faible; puis, pendant une ou deux secondes seulement, dans de l'acide nitrique concentré, auquel on a ajouté un peu de sel marin : c'est le *décapage*. Enfin, la pièce est rincée soigneusement, et portée au bain d'argent ou au bain d'or.

Lorsqu'on veut argenter ou dorer une lame d'acier, un couteau à dessert par exemple, on ne peut pas déposer directement le métal précieux sur le fer : l'adhérence serait tellement imparfaite que le dépôt pourrait être détaché comme un ruban, et sans le moindre effort. On tourne cette difficulté en couvrant préalablement la lame d'un mince dépôt de cuivre, qui sert d'intermédiaire entre les deux métaux, et les unit d'une manière parfaite.

VI. — EFFETS PHYSIQUES ET PHYSIOLOGIQUES DES COURANTS.

551. **Effets calorifiques.** — Lorsqu'on met un fil de métal en communication avec les deux pôles d'une pile, il s'échauffe et sa température s'élève parfois jusqu'à l'incandescence.

Il est facile de constater que les dimensions du fil ont une influence très-grande sur la température qu'il acquiert, sous l'action du courant produit par une pile déterminée. — En employant une pile de Bunsen de trois ou quatre éléments, et en réunissant les pôles par un fil de platine un peu fin, de quelques centimètres de longueur, on voit ce fil rougir : si l'on diminue successivement la longueur du fil que le courant doit traverser, l'incandescence devient de plus en plus vive. — Enfin, si l'on prend un fil d'un très-petit diamètre, on arrive facilement à le fondre, en n'en introduisant dans le courant qu'une longueur suffisamment petite.

La disposition de la pile a également une influence sur la température à laquelle elle peut amener un conducteur déterminé. — Lorsqu'on augmente successivement le nombre des éléments associés *en série* (541), on observe que les effets calorifiques n'augmentent que très-peu en intensité. — Au contraire si l'on réunit les éléments *en batterie* (542), ou, ce qui revient au même, si l'on opère avec des éléments offrant une surface un peu grande, ces effets deviennent immédiatement beaucoup plus intenses. Ainsi, un simple couple de Wollaston, qui offre toujours une surface assez grande, suffit pour fondre un fil de platine un peu fin (*fig.* 383) : ce même fil serait à peine rougi par une pile à colonne, ou par une pile à tasses, formée d'un grand nombre d'éléments à petite surface.

Les piles en hélice sont évidemment aptes à produire des effets calorifiques très-intenses. — Avec une pile de Wollaston de 21 couples, dont chaque zinc avait près de 4 mètres carrés de surface, M. Children a pu fondre des tiges de platine ayant 7 centimètres de longueur et 5 millimètres de diamètre.

552. **Effets lumineux. — Arc voltaïque : lumière électrique.** — Lorsqu'on approche lentement l'un de l'autre les conducteurs qui communiquent avec les pôles d'une pile d'un grand nombre d'éléments, on constate qu'il faut les amener jusqu'au contact pour qu'il jaillisse entre eux une étincelle. Ce résultat prouve que les tensions polaires sont très-faibles, et ne peuvent vaincre la résistance de l'air qu'à une distance très-petite. — Si, au contraire, après avoir amené ces conducteurs au contact, on les éloigne graduellement, on voit se produire entre eux un jet lumineux qui a reçu le nom d'*arc voltaïque*.

L'arc voltaïque a été observé pour la première fois par Davy, au moyen de la pile à auge de 2000 couples qui a servi à ses expériences sur les effets chimiques de l'électricité (524). — Les conducteurs interpolaires se

terminaient par des cônes de charbon A et B (*fig.* 406), qu'on avait façonnés avec du charbon de bois, fortement calciné et éteint dans le mercure. Lorsque, après avoir mis ces deux cônes en contact, on les amenait à un demi-millimètre de distance, on voyait se produire entre eux un jet lu-

Fig. 406.

mineux éblouissant, qui s'étendait à mesure qu'on les éloignait graduellement, jusqu'à une distance d'environ 10 centimètres : il avait la forme d'un arc convexe, comme l'indique la figure. — Les charbons devenaient incandescents dans une partie de leur longueur, et brûlaient avec assez de rapidité pour qu'on pût difficilement entretenir pendant quelque temps l'arc lumineux dans l'air : aussi, la plupart des expériences furent-elles faites dans l'air raréfié par la machine pneumatique, de manière que la petite quantité d'oxygène de cet air était rapidement consommée.

Pour produire la *lumière électrique*, on substitue maintenant, aux cônes de charbon de bois dont Davy avait fait usage, des baguettes de charbon de cornue (*) taillées en pointe, qui sont beaucoup plus denses et beaucoup moins combustibles. — Cependant, même avec ces baguettes, la distance des pointes augmente sans cesse, de sorte que, si l'on n'a pas soin de les rapprocher successivement, le courant est promptement interrompu : de là, l'emploi d'appareils *régulateurs*, effectuant ce rapprochement à mesure qu'il devient nécessaire, sans que l'opérateur soit obligé d'intervenir : nous indiquerons plus loin le principe de l'un de ces appareils, dont l'emploi est déjà devenu si général, pour les circonstances où l'on veut obtenir un éclairage d'une très-grande intensité (chap. VI). — Avec une pile de 25 à 30 éléments de Bunsen, on obtient déjà des effets lumineux satisfaisants : avec 50 ou 60 couples, il se produit une lumière assez intense pour éclairer à une distance considérable et dont l'éclat, quand on la regarde directement, rappelle celui du soleil.

*) Voir la deuxième note de la page 427.

553. L'arc voltaïque est formé de particules matérielles entraînées dans le courant. — L'observation attentive des phénomènes qui se produisent, entre les deux surfaces polaires que réunit l'arc voltaïque, fournit plusieurs résultats remarquables.

Quand ces surfaces sont formées par des baguettes de charbon, on voit la baguette positive se creuser à son extrémité : des particules de charbon sont arrachées, dont les unes brûlent dans l'air, les autres se transportent sur l'extrémité incandescente de la baguette négative. — Des phénomènes analogues se produisent quand on place, dans une cavité pratiquée au sommet du charbon positif, un fragment de métal : on constate que des particules métalliques en fusion viennent se rendre sur le charbon négatif. — Enfin il s'effectue encore un transport de matières quand les deux surfaces polaires sont métalliques. En opérant avec des surfaces formées de métaux différents, on observe, comme dans les décharges produites par les appareils d'électricité statique (465, 4°), que ce transport s'effectue à la fois dans les deux sens : mais il est surtout considérable du pôle positif au pôle négatif.

Toutes ces observations conduisent à admettre que l'arc voltaïque est formé par le passage du courant *à travers les particules matérielles* qui se transportent d'un pôle à l'autre. — La présence de l'air au milieu de ces particules diminue toujours la conductibilité ; et, toutes choses égales d'ailleurs, l'arc peut acquérir une longueur d'autant plus grande que l'air ambiant est plus raréfié.

Enfin, on voit que l'arc voltaïque peut être considéré comme un conducteur interposé dans le circuit, mais c'est toujours un conducteur offrant une résistance considérable : aussi, pour obtenir une lumière un peu intense, est-il nécessaire d'employer un assez grand nombre d'éléments associés, soit *en une série unique*, soit *en un petit nombre de séries* (541 et 543).

554. Température de l'arc voltaïque. — Davy avait déjà constaté, dans ses expériences, que la température de l'arc voltaïque est extrêmement élevée ; il avait déjà annoncé que les substances les plus réfractaires, telles que le platine, le quartz, le manganèse, la chaux, placées au milieu de l'arc, entrent en fusion ; que des fragments de plombagine ou de diamant y brûlent instantanément, même lorsqu'on opère au milieu de l'air raréfié par la machine pneumatique. — On doit à Despretz des expériences sur les effets calorifiques auxquels on peut atteindre en joignant, à la chaleur de l'arc voltaïque, celle du soleil concentrée par des lentilles puissantes, et celle d'un chalumeau à gaz oxygène. Despretz est ainsi parvenu, en opérant dans le vide, à réduire en vapeur toute espèce de charbon, et le diamant lui-même. Les baguettes de charbon sont ramollies et peuvent être courbées ou soudées entre elles ; le diamant se transforme en une espèce de graphite qui laisse, quand on le frotte sur le papier, une trace noirâtre.

555. **Effets physiologiques. — Les courants constants ne produisent d'effets physiologiques qu'au moment de l'établissement du circuit, ou au moment de la rupture.** — Depuis l'expérience de Galvani (511), un grand nombre de recherches ont été entreprises pour déterminer les conditions dans lesquelles les courants électriques peuvent agir sur les organes des animaux, soit peu de temps après la mort, soit pendant la vie. — Nous ne parlerons ici que des conditions *physiques* auxquelles il faut satisfaire pour que ces effets puissent se produire.

Lorsqu'on ferme le circuit d'une pile par l'intermédiaire d'une partie du corps d'un animal vivant, ou d'un animal mort depuis peu, on observe, en général, que l'établissement du courant donne lieu à une contraction, dont l'énergie dépend de l'intensité du courant lui-même. Pendant tout le temps que le courant circule, s'il n'éprouve pas de variations d'intensité, on n'observe pas de contractions. Si l'on interrompt brusquement le circuit, une nouvelle contraction se produit au moment de la rupture. — Quand on opère sur un animal vivant, ou sur l'homme lui-même, chacune de ces contractions est accompagnée, le plus souvent, d'une commotion plus ou moins douloureuse.

Avec les courants d'une faible intensité, l'une de ces deux contractions peut devenir insensible : c'est tantôt la première, tantôt la seconde, selon la façon dont les pôles sont placés par rapport à l'organe soumis à l'expérience. C'est là une question que nous n'avons pas à examiner : il nous suffira de savoir que les deux contractions se produisent *toujours* avec des courants suffisamment intenses.

Des expériences faites sur des cadavres de suppliciés, par Aldini à Bologne, par le docteur Ure à Glascow, et en divers autres pays par un grand nombre d'expérimentateurs, ont montré que des courants intenses, en traversant telle ou telle partie du corps peu de temps après la mort, mettent en jeu les muscles de manière à imiter les mouvements qui s'effectuent pendant la vie : l'extension ou la flexion des membres, les mouvements respiratoires, les contractions du visage qui expriment les différentes passions, ont été ainsi reproduits avec une vérité parfois effrayante (*).

556. **Usage des interrupteurs.** — Les commotions et les contractions ne se produisant dans les organes qu'au moment de l'établissement

(*) Quelle que soit la façon dont s'exerce cette action de l'électricité sur l'économie animale, on doit regarder comme un résultat d'expérience que l'énergie des commotions dépend de l'intensité du courant. Or, remarquons que les organes des animaux, qui sont imprégnés de liquides dans toutes leurs parties, constituent toujours des conducteurs dont la résistance est très-grande. Donc, si un courant doit traverser une longueur un peu considérable d'un pareil conducteur, il ne peut conserver une intensité notable, qu'à la condition d'être produit par une pile contenant un certain nombre d'éléments *associés en série* (541). — Au contraire, une pile formée de couples associés *en batterie*, ou, ce qui revient au même, une pile formée d'un petit nombre d'éléments à grande surface, ne produit que des effets tout à fait insensibles (542).

On s'explique ainsi comment une pile à colonne, d'une cinquantaine d'éléments,

du courant et au moment de la rupture, il est nécessaire, quand on veut en multiplier le nombre dans un court intervalle, d'établir et de rompre fréquemment le circuit. — C'est ce qu'on fait, par exemple, quand on cherche à déterminer des contractions répétées dans un organe paralysé, pour lui rendre insensiblement la contractilité. — Pour plus de facilité, on interpose alors, dans le circuit, un *interrupteur*.

La disposition de ces appareils est très-variable, et nous ne ferons que l'indiquer d'une manière générale. Tantôt c'est une tige métallique oscillante, dont l'une des extrémités est fixe et communique avec l'un des pôles de la pile, et dont l'autre extrémité vient toucher, à chaque oscillation, une pièce métallique, communiquant avec l'autre pôle. Tantôt c'est une roue dentée métallique, mise en communication permanente avec l'un des pôles, et dont les dents viennent successivement toucher un ressort communiquant avec l'autre pôle.

Au reste, il est assez rare qu'on emploie directement les courants produits par les piles, pour obtenir des contractions répétées ou des effets physiologiques analogues : on préfère les appareils fondés sur les propriétés des courants d'induction, comme ceux dont nous dirons quelques mots plus loin.

produit, quand on touche simultanément ses deux extrémités avec les mains mouillées, une commotion assez vive, tandis qu'une pile formée de 12 couples de Wollaston ne donne lieu qu'à une secousse légère.

Avec une pile convenablement disposée et suffisamment énergique, les effets physiologiques acquièrent parfois une intensité extrême. Ainsi 2000 couples, semblables à ceux qui furent réunis dans les expériences de Davy, peuvent foudroyer un cheval ou un bœuf.

CHAPITRE IV

ÉLECTRO-MAGNÉTISME

---

557. **Phénomènes électro-magnétiques.** — La déviation qu'éprouvent en général les aiguilles d'un galvanomètre, lorsque le fil de l'instrument est parcouru par un courant (531), prouve qu'un courant électrique, placé dans le voisinage d'une aiguille aimantée, exerce sur elle une action particulière. — L'étude des phénomènes produits par les actions des courants sur les aimants, et des particularités diverses qu'ils présentent, selon les conditions dans lesquelles ces actions s'exercent, constitue une branche de l'étude de l'électricité, à laquelle on a donné le nom d'*Électro-magnétisme*.

I. — EXPÉRIENCE D'ŒRSTED ET LOI D'AMPÈRE. CONSTRUCTION ET USAGES DU GALVANOMÈTRE.

558. **Expérience d'Œrsted.— Loi d'Ampère.** — L'action que peut exercer un fil conducteur fixe, traversé par un courant, sur un aimant placé dans le voisinage, fut observée pour la première fois, en 1820, par Œrsted, professeur à Copenhague. Ce physicien, en plaçant un fil métallique, dans une direction parallèle à une aiguille aimantée mobile sur un pivot, vit celle-ci abandonner sa position d'équilibre dès qu'on faisait passer dans le fil le courant d'une pile. — Le sens de la déviation observée dépendait, et de la direction du courant, et de sa position par rapport à l'aiguille : ainsi, quand le fil XY était placé au-dessus de l'aiguille (*fig.* 407), selon que le courant allait du nord au sud ou en sens contraire, le pôle austral de l'aiguille était dévié vers l'est ou vers l'ouest, c'est-à-dire dans le sens de la flèche F ou dans le sens de la flèche F′; lorsqu'on plaçait au contraire le fil au-dessous de l'aiguille (*fig.* 408), un courant allant dans l'un des deux sens précédents produisait une déviation inverse. — Enfin,

un courant vertical, placé en face de l'un des pôles de l'aiguille, produisait des effets différents, selon le sens dans lequel il se propageait, et selon le pôle en présence duquel il était placé. — Œrsted chercha vainement à saisir une relation simple entre ces divers phénomènes.

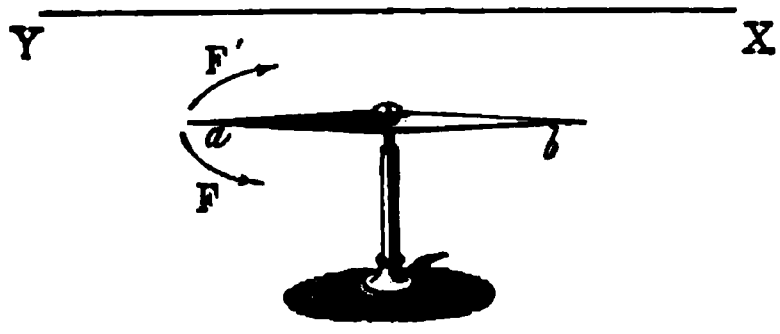


Fig. 407.

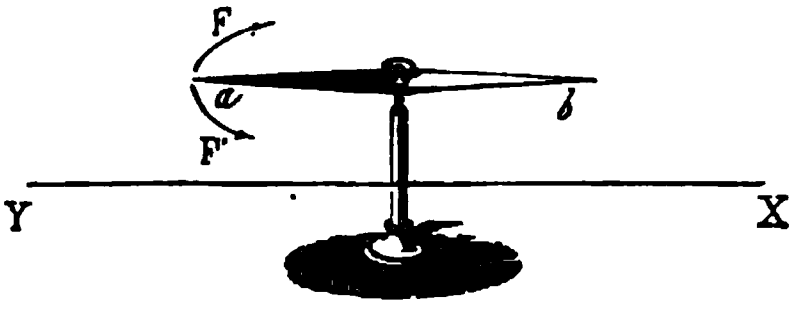


Fig. 408.

On doit à Ampère d'avoir montré que tous ces résultats peuvent être compris dans un même énoncé :

Un courant agissant sur un aimant tend toujours à le placer dans une position perpendiculaire à la sienne, et de manière que le pôle austral soit à la gauche du courant. — Pour définir ce qu'on doit entendre par la *gauche du courant*, Ampère suppose que l'observateur se place suivant la direction même du conducteur, de telle façon que le courant entre par ses pieds et sorte par sa tête, son visage étant tourné du côté de l'aiguille: la droite et la gauche de l'observateur sont alors *la droite* et *la gauche du courant*.

Il est aisé de voir, en se reportant à l'expérience d'Œrsted, que l'énoncé d'Ampère en comprend toutes les particularités. — Nous aurons du reste souvent l'occasion d'appliquer cette loi et d'en vérifier l'exactitude.

559. **Application à l'étude des courants. — Multiplicateur de Schweigger.** — On voit immédiatement le parti qu'on peut tirer de l'expérience d'Œrsted, interprétée par la loi d'Ampère, non-seulement pour constater l'*existence* d'un courant, mais pour en déterminer la *direction* d'une manière précise. — Il suffit de présenter, à une aiguille aimantée mobile sur un pivot, l'un des fils conducteurs dans lesquels le courant est supposé se propager, en plaçant ce fil dans le méridien magnétique, au-dessous de l'aiguille par exemple. Si l'aiguille est déviée, c'est que le fil est en effet traversé par un courant: pour en connaître la direction, il suffira que l'observateur se suppose placé sur le fil, le visage tourné vers l'aiguille, et de façon que le pôle austral de l'aiguille soit à gauche: le courant sera alors dirigé, dans le fil, des pieds vers la tête de l'observateur.

Toutefois, comme l'action de la terre tend à maintenir l'aiguille dans le méridien magnétique, ou à l'y ramener quand elle en a été écartée, les courants peu intenses ne produisent guère, quand l'expérience est ainsi faite, qu'un écartement de l'aiguille à peine appréciable. — Schweigger

eut l'idée d'augmenter l'action exercée par le courant, en multipliant autour de l'aiguille les portions du fil qui peuvent agir sur elle.

Pour nous rendre compte de l'efficacité du *multiplicateur* qui fut construit par lui, supposons d'abord que le fil conducteur ait été plié en un rectangle ABCDF (*fig.* 409), au milieu duquel nous placerons l'aiguille aimantée *ab*. Si le fil est parcouru par un courant dans le sens des flèches indiquées ci-contre, il est facile de voir, en considérant successivement chacune des quatre portions rectilignes du courant AB, BC, CD, DF, qu'elles ont leur gauche chacune en avant du plan de la figure: donc les actions de ces quatre portions *concordent* pour amener le pôle austral de l'aiguille en avant de ce plan.

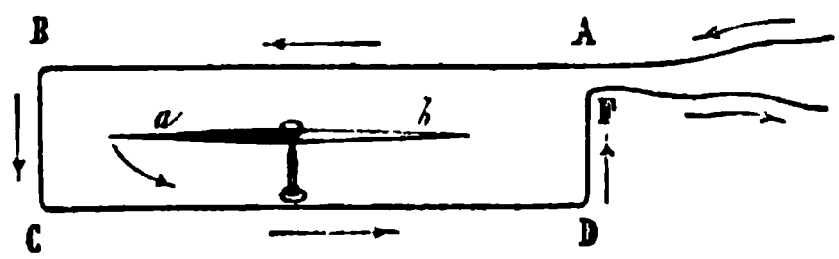


Fig. 409.

Si maintenant, au lieu de former avec un fil un simple rectangle autour de l'aiguille, on l'enroule, un grand nombre de fois et toujours dans le même sens, sur un cadre rectangulaire CC (*fig.* 410), tous les tours ainsi formés seront parcourus dans le même sens par le courant; ils exerceront donc des actions concordantes sur une aiguille aimantée *ab*, placée dans l'intérieur du cadre; avant d'appliquer le fil sur le cadre, on a d'ailleurs eu soin de l'entourer de soie, dans toute sa longueur, afin d'isoler les uns des autres les tours contigus. Enfin, comme les mouvements d'une aiguille sur un pivot développent toujours des frottements assez considérables, on peut suspendre l'aiguille aimantée, comme l'indique la figure 410, à un fil de soie sans torsion, qui passe dans une ouverture pratiquée au travers du cadre. — Si le fil conducteur fait quelques centaines de tours, cet appareil pourra permettre de constater l'existence de courants qui seraient tout à fait inappréciables par l'expérience d'Œrsted.

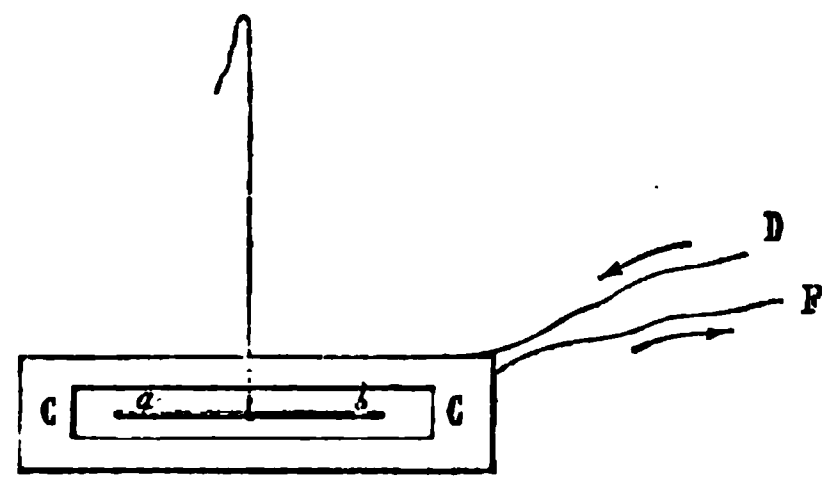


Fig. 410.

560. **Emploi de deux aiguilles formant un système astatique.** — On augmente considérablement encore la sensibilité du *multiplicateur*, en employant, comme l'a indiqué Nobili, un système *astatique* de deux aiguilles aimantées.

Supposons qu'on assujettisse l'une à l'autre deux aiguilles aimantées, soit en les faisant passer au travers d'une paille M (*fig.* 411), soit en les réunissant par une petite tige de cuivre; qu'on ait soin de les placer parallèlement entre elles, mais de façon que leurs pôles contraires se cor-

respondent, comme l'indique la figure ; enfin que l'on suspende le système à un fil de soie sans torsion G. — Si les deux aiguilles étaient parfaitement identiques, pour la grandeur et le degré d'aimantation, il est clair que les actions exercées sur leurs pôles par la terre se neutraliseraient toujours, quelle que fût l'orientation, et que le système resterait en équilibre *dans une position quelconque* : on dirait alors qu'il est complétement *astatique*. Si au contraire, ainsi que nous le supposerons dans tout ce qui va suivre, l'une des aiguilles possède une aimantation un peu plus énergique, si par exemple l'aiguille supérieure est un peu plus fortement aimantée que l'aiguille inférieure, la terre agit faiblement sur le système, et c'est le pôle a' qui se dirige vers le nord; lorsqu'il est écarté de cette position, la terre tend à l'y ramener, et *l'action directrice de la terre est égale à la différence des actions exercées sur chacune des aiguilles*.

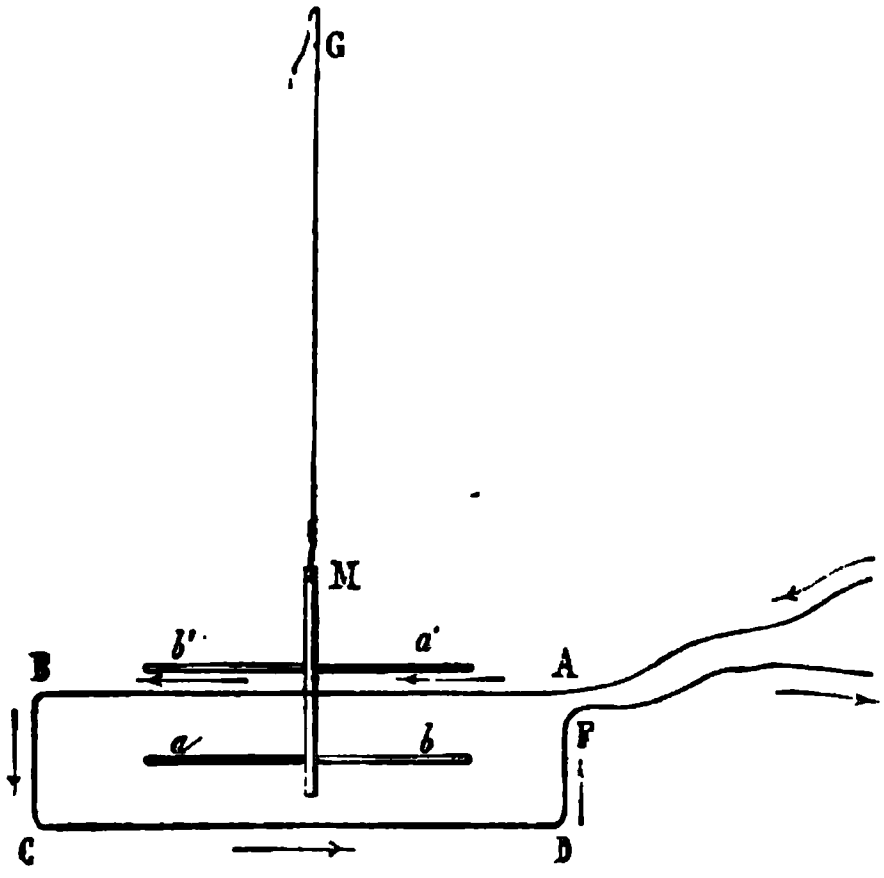


Fig. 411.

Voyons maintenant quelles sont les actions qu'éprouve un pareil système, de la part d'un courant passant dans un fil rectangulaire ABCDF orienté dans le méridien magnétique, l'aiguille inférieure *ab* étant placée au milieu de ce rectangle, et l'aiguille supérieure $a'b'$ étant en dehors, et assez près du côté supérieur AB. — Le courant qui passe dans le fil, s'il se propage dans le sens des flèches, agit d'abord, comme nous l'avons vu, par les quatre côtés du rectangle à la fois, pour amener le pôle austral *a* de l'aiguille inférieure en avant du plan de la figure; il nous reste donc à considérer son action sur l'aiguille supérieure. Or, en appliquant la loi d'Ampère, on voit que le côté supérieur AB du rectangle tend à porter le pôle austral a' en arrière du plan de la figure, et par suite le pôle b', qui correspond à *a*, en avant; cette action concorde avec celles qui s'exercent sur l'aiguille *ab* Quant aux actions exercées sur l'aiguille $a'b'$ par les trois côtés BC, CD, DF, il est facile de voir qu'elles sont inverses; mais, comme ces côtés sont beaucoup plus éloignés de l'aiguille $a'b'$ que le côté AB, leurs actions sont beaucoup plus faibles; l'action totale du rectangle sur l'aiguille supérieure doit donc être considérée comme s'ajoutant à l'action exercée sur l'aiguille inférieure, en sorte que *ces deux*

actions tendent à faire tourner le système dans le même sens. — Si, au lieu d'un simple rectangle, on a un cadre portant un grand nombre de tours, chaque tour se comporte, par rapport aux aiguilles, comme le courant rectangulaire qui vient d'être considéré.

On voit donc, en résumé, que l'introduction, dans le *multiplicateur*, d'un système de deux aiguilles aimantées, d'une intensité presque égale, c'est-à-dire formant un système *presque astatique*, offre deux avantages : 1° de *diminuer* considérablement l'action directrice de la terre, qui combat toujours l'action du courant ; 2° d'*augmenter* l'action du courant lui-même. — Pour ces deux raisons, la sensibilité de l'appareil devient beaucoup plus grande.

561. **Galvanomètre.** — Le *galvanomètre* (*fig.* 412), dont nous avons eu déjà à faire usage, n'est autre chose qu'un multiplicateur auquel on a joint un cercle divisé, pour mesurer les déviations de l'aiguille. — Nous pouvons maintenant en donner une description complète.

Un système de deux aiguilles aimantées, disposées comme il vient d'être dit, est suspendu à un fil de cocon L ; ce fil est soutenu par un crochet fixé à un bouton K, qui permet de le faire monter ou descendre de petites quantités. Sur le cadre d'ivoire AB, est enroulé un fil de cuivre couvert de soie, et les extrémités de ce fil vont aboutir à deux boutons métalliques C, C', fixés sur une planchette d'ivoire D. L'aiguille inférieure est au milieu du cadre (on n'en peut voir qu'une petite partie dans la figure ci-dessus) ; l'aiguille supérieure est en dehors du cadre, au centre d'un cercle de cuivre plein S, dont le contour est divisé en degrés ; le rayon du cercle qui correspond au zéro de cette graduation est placé parallèlement aux tours du fil métallique. L'appareil est environné d'une cloche cylindrique de verre PP', qui préserve les aiguilles des agitations de l'air.

Fig. 412. — Galvanomètre.

Lorsqu'on veut mettre le galvanomètre en expérience, on le *règle* d'a-

bord de la manière suivante. On fait mouvoir, s'il est nécessaire, les vis calantes, V, V, V, afin de rendre le cercle S horizontal, en sorte que le fil de cuivre qui réunit les aiguilles passe dans l'ouverture pratiquée au centre de ce cercle, sans en toucher les bords ; le système des aiguilles prend alors une position d'équilibre stable, et l'on oriente le cadre AB parallèlement aux aiguilles. C'est ce à quoi on arrive en faisant tourner le cercle et le cadre autour de leur axe vertical, au moyen d'un engrenage qui correspond au bouton extérieur E, jusqu'à ce que le zéro de la graduation vienne se placer sous l'une des extrémités de l'aiguille supérieure.

On fixe alors des fils conducteurs dans les boutons C, C′, au moyen de vis de pression, et, si ces fils font partie d'un circuit fermé qui soit parcouru par un courant appréciable au galvanomètre, la déviation observée fournit à la fois le *sens* du courant et son intensité (531), à la condition qu'on ait construit d'avance, pour l'instrument dont il s'agit, une table qui donne, en regard des diverses déviations, les intensités des courants qui les produisent. On sait d'ailleurs que, dans les cas où les déviations ne dépassent pas 20 à 30°, on peut les regarder comme sensiblement *proportionnelles aux courants qui les produisent*.

* 562. **Graduation du galvanomètre à deux fils.** — M. Becquerel a fait construire des galvanomètres *à deux fils*, qui sont d'un usage très-simple pour l'évaluation des intensités des courants. — Pour construire un semblable instrument, on choisit deux fils métalliques de même diamètre et de même longueur, et, après les avoir couverts de soie, on les tord ensemble dans toute leur étendue ; on enroule ensuite autour du cadre du galvanomètre l'espèce de corde formée par ces deux fils, et l'on fait communiquer les extrémités de chacun d'eux avec des boutons métalliques séparés.

Supposons qu'un premier courant, traversant l'un des fils, ait donné une déviation de 13° ; qu'un second courant, traversant l'autre fil dans le même sens ait donné une déviation de 19° : si on les fait passer simultanément, ils auront sur les aiguilles une action dont l'intensité sera représentée par 32 ; si donc on n'observe qu'une déviation de 30°,5 c'est qu'une déviation de 30,°5, correspond à l'intensité 32. — De même, si deux courants donnent séparément les déviations 17° et 20°, et simultanément la déviation 35°, on inscrira sur la table de graduation, en face de l'angle de déviation de 35°, l'intensité 37, et ainsi de suite. — L'expérience ainsi faite montre que, jusqu'à 30° environ, les déviations sont *proportionnelles aux intensités des courants*.

Le galvanomètre à deux fils est souvent désigné aussi sous le nom de *galvanomètre différentiel*, parce qu'il permet d'apprécier la différence d'intensité de deux courants, en les faisant passer simultanément et en sens contraire, l'un dans un fil, l'autre dans l'autre.

563. **Des différences à apporter dans la construction des galvanomètres, selon les usages auxquels ils doivent être employés.** — L'interposition du fil d'un galvanomètre, dans un circuit parcouru par un courant, introduit toujours dans ce circuit une résistance qui a pour effet de diminuer l'intensité du courant lui-même. — Or, lorsqu'il s'agit du courant d'une source hydro-électrique, dont la résistance propre est déjà très-grande, la résistance d'un fil métallique est peu considérable par rapport à celle des autres portions du circuit, alors même que ce fil serait très-long et très-fin. On a donc tout avantage, dans ce cas, à multiplier beaucoup les tours de fil sur le cadre du galvanomètre, afin d'accroître l'action qu'ils exercent sur l'aiguille. On prend d'ailleurs ce fil aussi fin que possible, afin de pouvoir l'enrouler plusieurs milliers de fois sur le cadre. — On construit aujourd'hui des galvanomètres *à long fil*, qui comprennent de deux mille à trente mille tours, et qui sont, pour les courants des sources hydro-électriques, d'une extrême sensibilité.

Au contraire, lorsqu'il s'agit de courants produits par des piles très-conductrices, comme les piles thermo-électriques qui seront étudiées plus loin, l'interposition d'un fil métallique un peu fin introduirait dans le circuit une résistance énorme par rapport à celle qu'offrent les autres parties. De là résulterait une diminution dans l'intensité du courant, qui pourrait rendre tout à fait insensible son action sur l'aiguille aimantée. Il est donc indispensable, dans ce cas, d'employer un instrument dont le fil soit assez gros et assez court. — On construit, pour cet usage, des galvanomètres *à gros fil*, qui comprennent de trente à trois cents tours.

II. — ACTIONS DES COURANTS SUR LES AIMANTS ET ACTIONS RÉCIPROQUES.

564. **Loi de l'action exercée par un courant rectiligne sur un aimant.** — L'action exercée par un courant rectiligne sur un aimant est une action qui tend à mettre l'aimant en croix avec le courant, le pôle austral de l'aimant étant à gauche du courant : c'est la conséquence qui ressort des divers résultats de l'expérience d'Œrsted, interprétée par la loi d'Ampère (558). — Les expériences de Biot et Savart, soumises au calcul par Laplace, ont montré que tous les phénomènes observés, en faisant varier les conditions de cette expérience, peuvent être réunis dans la loi suivante :

Lorsqu'un courant rectiligne et indéfini est en présence d'un aimant, chaque pôle de l'aimant est sollicité par une force dont la direction est perpendiculaire au plan qui passe par ce pôle et par le courant. L'intensité de cette force varie en raison inverse de la distance du pôle au courant lui-même.

565. **Exemples de mouvements divers, imprimés à des aimants par des courants.** — L'énoncé qui précède permet de prévoir dans quelles circonstances un aimant mobile doit se mettre en mouvement ou rester en équilibre, sous l'influence d'un courant rectiligne indéfini et fixe. — Dans chaque cas particulier, suivant la nature des liaisons auxquelles l'aimant est assujetti, l'action du courant peut déterminer, soit une *orientation*, soit un mouvement de *translation*, soit un mouvement de *rotation continue:* c'est ce que nous allons montrer par quelques exemples.

1° L'*orientation* d'une aiguille aimantée sous l'influence d'un courant est réalisée dans l'expérience d'Œrsted; nous n'y reviendrons pas.

2° Dans l'expérience suivante, due à Boisgiraud, l'action électro-magnétique détermine un mouvement de *translation* de l'aiguille. — Une aiguille aimantée très-légère AB (*fig.* 413) flotte à la surface de l'eau; sous l'influence de la terre, elle se place dans le plan du méridien magnétique, que nous supposerons être le plan de la figure. Perpendiculairement au méridien magnétique, on dispose un long fil de cuivre rectiligne, dont C représente la section et dont les deux extrémités peuvent être mises en communication avec les pôles d'une pile: dès que le courant passe, on voit l'aiguille prendre un mouvement de translation suivant sa propre direction, mouvement dont le sens dépend du sens du courant et de la position du fil par rapport aux deux pôles magnétiques (*).

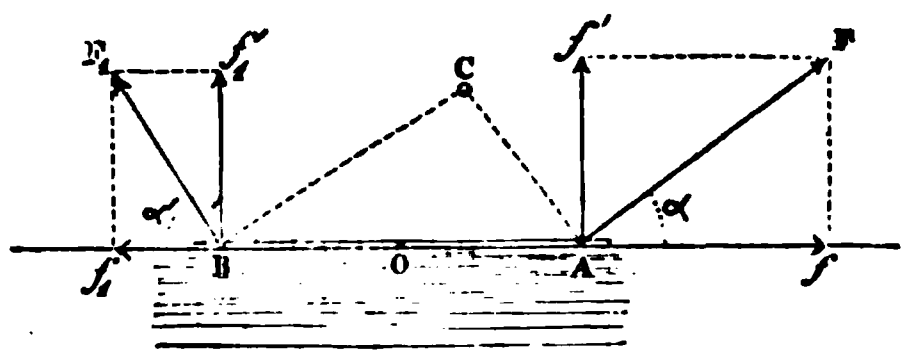


Fig. 413.

3° Enfin, Faraday est parvenu à produire la *rotation continue* d'un aimant sous l'influence d'un courant, de la manière suivante. — On place

(*) Pour nous rendre compte de ce fait, supposons que le courant soit dirigé, dans le fil C, d'arrière en avant du plan de la figure, et que ce fil soit placé au-dessus de la moitié australe OA de l'aiguille. Le pôle A sera sollicité par une force F, située dans le plan de la figure et perpendiculaire à CA (564); de même, le pôle B sera sollicité par une force F_1, située dans le même plan et perpendiculaire à CB. La force F peut se décomposer en deux autres, l'une f égale à F cos α et dirigée suivant le prolongement de BA, l'autre f' qui est verticale; de même F_1 peut se décomposer en une force f_1 égale à $F_1 \cos \alpha'$ et dirigée suivant le prolongement de AB, et une force verticale f'_1 : les deux forces verticales f' et f'_1, qui ne peuvent tendre qu'à soulever l'aiguille, sont trop faibles pour vaincre la pesanteur et l'adhésion du liquide; les deux forces horizontales f et f_1 tendent à entraîner l'aiguille, l'une dans la direction BA, l'autre en sens contraire. Or les intensités des forces totales F et F_1 sont inversement proportionnelles aux distances CA et CB; F est donc plus grand que F_1 : la figure montre d'ailleurs que l'angle α et plus petit que α'; donc $\cos \alpha > \cos \alpha'$; donc, à plus forte raison, F cos α ou f est-il plus grand que $F_1 \cos \alpha'$ ou que f_1; la résultante des deux forces f et f_1 est donc dirigée dans le sens BA. L'aiguille doit donc, dans ce cas, prendre un mouvement de translation suivant BA, c'est-à-dire dirigé du sud au nord dans le plan du méridien magnétique. — Lorsque, par suite de ce mouvement, le milieu O arrive dans le plan vertical passant par la direction du courant,

verticalement, au milieu du mercure que contient une large éprouvette de verre (*fig.* 414), un barreau aimanté *a*, lesté par un petit cylindre de platine *p*; un anneau métallique K, qui garnit intérieurement la partie supérieure de l'éprouvette, sert à mettre le mercure en communication, par le contour de sa surface, avec l'un des pôles d'une pile; le centre de cette même surface est mis en communication avec l'autre pôle de la pile, au moyen de la tige métallique T. — Au moment où l'on ferme le circuit, on voit l'aimant se rapprocher d'abord de la tige T, en tournant autour d'elle, puis arriver au contact avec cette tige; il continue alors à tourner, pendant tout le temps que le courant passe. — Si les pôles sont placés comme le suppose la figure, le courant marche, à la surface du mercure, de l'extrémité de la tige T vers les divers points de l'anneau K; alors, si le pôle émergé *a* est un pôle austral, la rotation s'effectue, en avant de la tige, de droite à gauche. — Si l'on intervertit le sens du courant, le sens de la rotation change également.

Fig. 414.

L'explication de ce mouvement peut se déduire des lois de l'électromagnétisme : nous nous contenterons de remarquer que le sens dans lequel il s'effectue, sous l'influence des portions les plus voisines du courant, est d'accord avec la loi d'Ampère (358). — Quant à la continuation du mouvement, on peut s'en rendre compte en remarquant que, pendant le déplacement du barreau, les courants qui se propagent à la surface du mercure conservent la même position par rapport au barreau lui-même : ils doivent donc continuer à exercer sur lui la même action, et lui communiquer un mouvement qui s'accélérerait indéfiniment sans la résistance du liquide. — Nous indiquerons, dans le chapitre suivant (579, 1°), comment ces mêmes résultats peuvent s'expliquer facilement dans une théorie du magnétisme qui est due à Ampère.

l'aiguille est animée d'une certaine vitesse, qui lui fait dépasser cette position; mais la force f_1 devient alors supérieure à f, la vitesse diminue, puis change de sens; l'aiguille oscille donc de part et d'autre de cette position d'équilibre stable, où elle finit par se fixer.

566. Exemples de mouvements imprimés à des courants par des aimants. — Lorsqu'un aimant fixe est placé dans le voisinage d'un conducteur mobile parcouru par un courant, ce conducteur peut se mettre en mouvement sous l'influence de l'aimant. — Ici encore, suivant les liaisons auxquelles le courant est assujetti, le mouvement produit peut être, soit une *orientation*, soit un mouvement de *translation*, soit un mouvement de *rotation continue*.

1° On obtient l'*orientation* d'un courant mobile, sous l'influence d'un aimant, au moyen des piles flottantes de M. de la Rive. — Une lame de zinc Z et une lame de cuivre C (*fig.* 415) sont assujetties dans une rondelle de liége, et réunies à leur partie supérieure par un fil métallique rigide L. Si l'on fait flotter la rondelle de liége sur un vase contenant de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, le fil est traversé par un courant dirigé du cuivre vers le zinc, comme l'indiquent les flèches. — Si l'on place horizontalement un aimant assez énergique au-dessus de la partie supérieure L et dans le même plan que le fil, on voit l'équipage tourner sur lui-même pour se mettre en croix avec l'aimant, sa gauche venant se placer du côté du pôle austral. — C'est, comme on voit, l'expérience inverse de celle d'Œrsted (558).

Fig. 415.

2° Le même appareil peut servir à observer un mouvement de *translation* d'un courant, sous l'influence d'un aimant. — Il suffit, pour cela, de placer le pôle d'un barreau aimanté un peu en avant du circuit CLZ (*fig.* 415) et à la hauteur de son centre, l'axe du barreau étant perpendiculaire au plan du courant. Si c'est le pôle austral qu'on présente, l'expérience montre qu'il y a répulsion dans le cas où le courant est dirigé de telle sorte, que l'observateur, placé au pôle austral du barreau, voie ce courant circuler en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre (comme le courant indiqué par la figure 415); il y a attraction si, toutes les conditions étant d'ailleurs les mêmes, le courant est vu circulant dans le même sens que le mouvement des aiguilles d'une montre (*).

(*) L'interprétation de ces faits par les principes fondamentaux de l'électro-magnétisme est un peu plus compliquée que celle de l'expérience de Boisgiraud (565, 2°), parce que le courant a une forme circulaire, nous ne la donnons pas ici. — Nous engagerons seulement le lecteur à revenir sur ces résultats, après avoir lu le chapitre V, et en considérant l'aimant comme assimilable à un solénoïde : ils apparaîtront alors comme une conséquence nécessaire de cette assimilation, et pourront aisément se fixer dans la mémoire

3° L'action d'un aimant fixe peut aussi produire la *rotation continue* d'une portion de courant mobile. C'est ce que montre l'expérience suivante, inverse, quant au résultat, de celle que nous avons décrite plus haut (565, 3°). — Une cuvette de zinc DD (*fig.* 416), contenant de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, porte en son centre une colonne métallique H; sur la coupelle *o* qui termine cette colonne, repose, par une pointe qui plonge dans du mercure, un équipage formé de deux fils métalliques verticaux *b* et *c*, et d'un cercle de cuivre horizontal plongé dans l'eau de la cuvette : l'équipage tout entier est ainsi rendu mobile autour d'un axe vertical passant par la pointe *i*. L'action de l'acide sulfurique sur le zinc développe un courant, dans le circuit qui est formé par la cuvette, le liquide acide, les fils verticaux et la colonne H; ce courant marche dans le sens des flèches de la figure. Si l'on place le pôle d'un aimant K au-dessous de la colonne métallique H, l'équipage prend un mouvement de rotation continu autour de son axe : si c'est le pôle austral de l'aimant qui a été présenté, la rotation a lieu de telle sorte que le système tourne dans le sens des flèches qui sont indiquées au milieu du liquide. — Le sens de cette rotation est, comme on voit, d'accord avec la loi d'Ampère (558), et la continuité du mouvement peut encore se concevoir en remarquant que les courants verticaux conservent, quelle que soit leur position absolue, la même position par rapport à l'aimant. — Nous donnerons plus loin (579, 2°) une interprétation de cette expérience dans la théorie du magnétisme qui est due a Ampère.

Fig. 416.

CHAPITRE V

ÉLECTRO-DYNAMIQUE

---

567. **Phénomènes électro-dynamiques.** — L'expérience d'Œrsted et les phénomènes produits par les actions des courants sur les aimants conduisirent Ampère à la découverte d'une autre série de phénomènes, relatifs à l'action des courants les uns sur les autres, et à l'action de la terre sur les courants : l'exposé de ces phénomènes et des lois qui les régissent constitue la branche de l'électricité, à laquelle on a donné le nom d'*électro-dynamique*.

I. — ACTIONS DES COURANTS SUR LES COURANTS.

568. Les actions des courants sur les courants peuvent toutes se déduire d'un petit nombre de principes fondamentaux, qu'Ampère a établis par l'expérience. Pour vérifier ces principes, on emploie des appareils de formes assez diverses, rappelant plus ou moins ceux qui ont servi à Ampère lui-même. Tous ces appareils présentent deux conducteurs métalliques, dont l'un est fixe et l'autre mobile. On fait passer, dans chacun de ces conducteurs, un courant électrique ; l'action que le conducteur fixe exerce sur le conducteur mobile, et qui détermine un mouvement de ce dernier, est ce qu'on nomme l'*action du courant fixe sur le courant mobile*.

569. **Principe des courants parallèles.** — *Deux courants parallèles et de même sens s'attirent ; deux courants parallèles et de sens contraire se repoussent.* — Pour vérifier ce principe, l'une des dispositions les plus simples est la suivante :

Un fil métallique *adefg* (*fig.* 417), replié comme l'indique la figure, est terminé à ses deux extrémités *a* et *b* par deux pointes d'acier verticales, qu'on plonge dans des godets pleins de mercure. Ces godets communi-

quent, l'un *a* avec une colonne métallique creuse H, dans laquelle on peut amener un courant, au moyen d'un fil partant de l'un des pôles d'une

Fig. 417.

pile et plongeant dans le godet M ; l'autre *b*, avec une tige métallique H', située à l'intérieur de H, isolée dans un tube de verre, et par laquelle le courant, après avoir parcouru l'équipage mobile, revient au godet N et à la pile. Au moyen de cette disposition, on obtient, comme voit, un conducteur rectangulaire qui peut, sans cesser d'être parcouru par le courant, tourner autour d'un axe vertical passant par *a* et *b*.

Pour avoir une autre portion de courant, dont nous puissions étudier l'action sur les diverses parties du premier, nous emploierons un cadre de bois rectangulaire MNPQ (*fig.* 418), sur lequel nous aurons enroulé un fil métallique couvert de soie : pour interposer ce fil dans le courant, il suffira de mettre ses extrémités, R, S, en communication avec les fils conducteurs de la pile.

Dès lors si, tenant à la main le cadre MNPQ, on approche le côté vertical MN du côté *fg*, on observe une vive attraction : or, les portions du fil qui couvrent le côté MN du cadre sont parallèles à *fg* (*fig.* 419), et le courant s'y propage dans le même sens que dans *fg*. — Donc *deux courants parallèles et de même sens s'attirent*.

Fig. 418.

Au contraire, si l'on approche ce même côté MN du côté *de* de l'équipage mobile, il se produit une répulsion très-vive ; or les portions du fil qui sont appliquées sur MN sont encore parallèles à *de* (*fig.* 420), mais elles sont parcourues par le courant en sens contraire. — Donc *deux courants parallèles et de sens contraire se repoussent.*

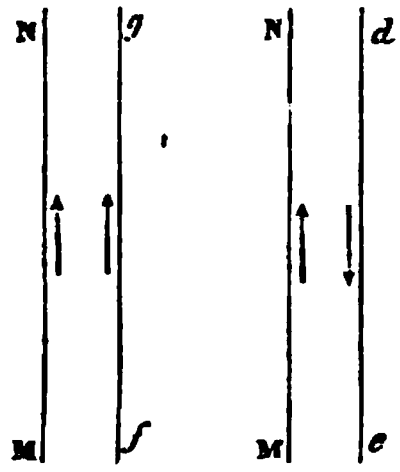


Fig. 419.

Fig. 420.

570. **Principe des courants non parallèles, ou courants croisés.** — *Deux courants non parallèles s'attirent quand ils s'approchent ou s'éloignent ensemble de leur point de croisement ; ils se repoussent quand l'un s'en approche tandis que l'autre s'en éloigne.*

Reprenons le cadre MNPQ (*fig.* 418), et plaçons le côté PN au-dessous de *fe* (*fig.* 417), de manière qu'il fasse avec lui un certain angle. Les courants se propageant dans le sens indiqué par les flèches de la figure 421, on voit le côté mobile *ef* tourner sur lui-même et ses deux moitiés O*e*, O*f* se porter respectivement vers ON et OP. Donc il y a attraction entre les deux côtés qui forment l'angle *e*ON et dans lesquels les deux courants s'approchent du sommet de l'angle ; il y a aussi attraction entre les côtés qui forment l'angle PO*f*, et dans lesquels les deux courants s'éloignent du sommet de l'angle.

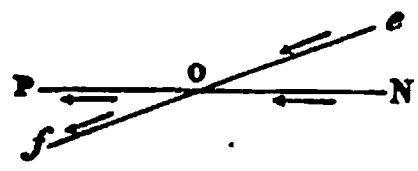


Fig. 421.

Au contraire, si l'on intervertit le sens du courant dans l'un des conducteurs, par exemple dans les fils qui ont la direction NP, de sorte que le courant prenne la direction PN (*fig.* 422), on voit les deux moitiés O*e* et O*f* s'éloigner respectivement de ON et de OP pour se porter vers OP et ON. — Donc il y a répulsion entre les deux côtés de l'angle *e*ON, dans lesquels l'un des courants s'approche du sommet de l'angle tandis que l'autre s'en éloigne. Il en est de même pour les côtés de l'angle PO*f*.

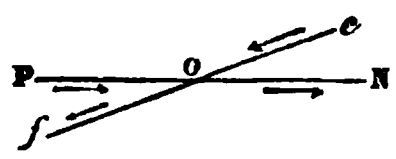


Fig. 422.

Remarque. — La proposition énoncée s'applique encore à deux courants non situés dans un même plan, comme *ab* et *cd* dans la figure 423, et c'est même toujours dans ces conditions que l'on réalise l'expérience. Au lieu du *point de croisement*, il faut alors considérer la *perpendiculaire commune pp'* à la direction des deux conducteurs. Il y a attraction entre les parties où les courants s'approchent ou s'éloignent ensemble de la perpendiculaire commune, et répulsion entre les parties où l'un des

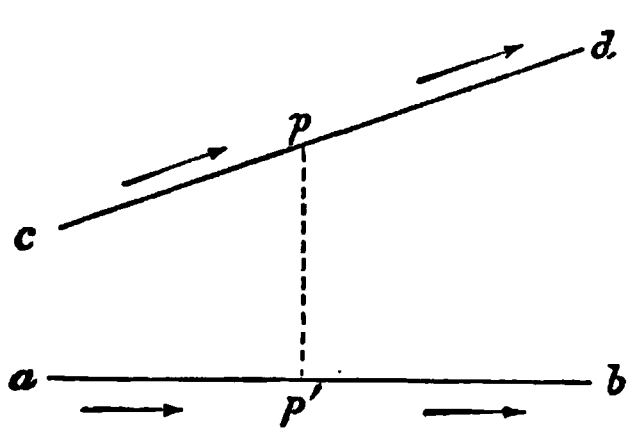


Fig. 423.

courants s'approche tandis que l'autre s'éloigne de cette perpendiculaire.

571. **Répulsion exercée entre deux portions consécutives d'un même courant rectiligne.** — Il résulte du principe précédent que deux portions consécutives d'un même courant rectiligne doivent se repousser. En effet, concevons un conducteur *abc* (*fig.* 424), formé de deux parties rectilignes faisant entre elles un angle obtus, et traversé dans le sens des flèches par un courant. Il doit y avoir répulsion entre *ab* et *bc*; car, dans l'une de ces parties, le courant s'approche du sommet de l'angle, tandis que dans l'autre il s'en éloigne.

Fig. 424.

La répulsion devant d'ailleurs avoir lieu, quelque grand que soit l'angle *abc*, il est présumable qu'elle se manifestera encore si *ab* vient se placer dans le prolongement *a'b* de *cb* : si l'on parvient à rendre mobile la portion *bc*, sans interrompre le courant, on devra le voir s'éloigner de *ab* supposé fixe.

Ampère a réalisé cette expérience de la manière suivante. Deux rigoles parallèles M et N (*fig.* 425) sont creusées dans une planche de bois et contiennent du mercure; à la surface du métal, dans les rigoles, sont placées les deux branches d'un fil de cuivre très-léger, couvert de soie et replié comme l'indique la figure; les extrémités du fil ont été mises à nu, recourbées, et plongent dans le liquide; le courant, arrivant en X et sortant en Y, traverse le mercure et le conducteur mobile dans le sens des flèches. Aussitôt que les communications sont établies, on voit ce conducteur vivement repoussé de gauche à droite; il y a donc répulsion entre les portions d'un même courant qui traversent successivement le mercure et le fil de cuivre.

Fig. 425.

572. **Principe des courants sinueux.** — *Un courant sinueux produit le même effet qu'un courant rectiligne, de même intensité et terminé aux mêmes extrémités, pourvu que la distance à laquelle s'exerce son action soit très-grande par rapport à l'amplitude des sinuosités.*

Pour vérifier ce principe, on prend un fil de cuivre *ihl* (*fig* 426), dont l'une des branches *ih* est rectiligne, l'autre *hl* sinueuse, et dont les extrémités communiquent avec les pôles de la pile : si le principe précédent est exact, l'action du système de ces deux fils sur un conducteur quel-

conque doit être nulle, puisque l'action de *hl* doit être équivalente à celle d'un courant rectiligne de même longueur et de même intensité que *ih*, mais de sens contraire. On constate, en effet, en approchant le système *ihl* de l'un quelconque des côtés du courant mobile de la figure 417, qu'il n'imprime aucun mouvement à ce courant, pourvu que la distance qui l'en sépare soit toujours très-grande par rapport à l'amplitude des sinuosités.

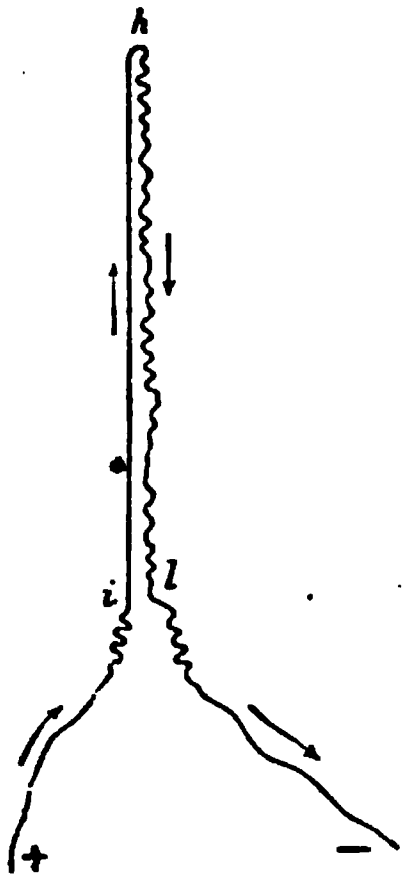


Fig. 426.

573. **Applications de ces principes à quelques cas particuliers.** — Nous allons appliquer les principes qui précèdent à l'étude de quelques-uns des cas particuliers les plus intéressants.

Dans chacun de ces cas, nous chercherons d'abord à déduire des principes eux-mêmes la nature du mouvement qui doit s'effectuer : la vérification expérimentale que nous donnerons ensuite pourrra être considérée comme une nouvelle confirmation des principes fondamentaux. — Ces exemples suffiront d'ailleurs pour faire comprendre la marche à suivre dans toutes les questions analogues.

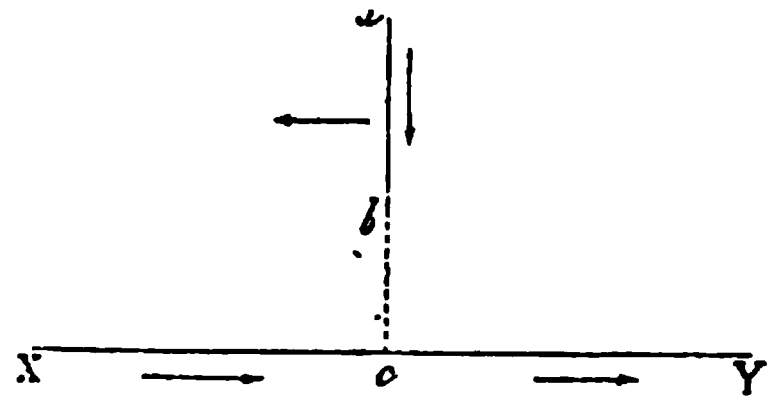


Fig. 427.

1° *Action d'un courant rectiligne indéfini et fixe sur un courant rectiligne fini, mobile parallèlement à lui-même.* — Pour définir les positions des deux courants, nous supposerons que le courant fixe XY (*fig.* 427) soit horizontal, que le courant mobile *ab* soit vertical et placé au-dessus du plan horizontal passant par le courant fixe; nous admettrons, en outre, que ces deux courants soient situés dans un même plan. — Si le courant mobile est descendant, comme l'indique la figure, il sera repoussé par la portion *c*Y et attiré par la portion *c*X (570); ces deux actions auront pour effet de transporter *ab* dans un sens contraire à celui du courant indéfini XY. — On verrait de même que, si le courant mobile est ascendant, il doit se déplacer dans le sens du courant fixe indéfini.

Le même raisonnement s'applique encore au cas où l'on viendrait à courber le courant XY, de manière à le transformer en un courant circulaire, situé dans un plan horizontal, le courant *ab* étant mobile autour d'un axe vertical passant par le centre du cercle. Ces conditions sont réalisées dans l'appareil représenté par la figure 428.

Un fil de cuivre entouré de soie s'enroule un certain nombre de fois autour d'un cadre circulaire de bois ; les deux extrémités *a* et *c* de ce fil communiquent avec le mercure des godets M et N ; V est un vase de cuivre, qui contient de l'eau acidulée et dont le bord replié couvre le cadre circulaire. (Une portion de ce bord est supposée enlevée, pour laisser apercevoir le cadre.) Une colonne métallique P traverse en son centre le vase de cuivre, dont elle est d'ailleurs isolée ; le pied de cette colonne communique, par une bande métallique *b* qui traverse la table,

Fig. 428.

avec le mercure du godet X ; les bords du vase lui-même communiquent avec le mercure du godet Y. Dans la capsule métallique qui termine la colonne P, repose, par une pointe fine *i*, l'équipage mobile *gefh*, dont les extrémités plongent dans l'eau acidulée. — Les communications entre la pile et les divers godets de mercure étant établies comme le montre la figure, le courant suit la route indiquée par les flèches, et l'on voit l'équipage *gefh* prendre un mouvement de rotation dont le sens est inverse de celui du courant circulaire. — Si, au contraire, on établit les communications de manière que le courant soit ascendant dans les côtés *eg*, *fh* de l'équipage mobile, on observe un mouvement de rotation, dont le sens est le même que celui du courant circulaire.

2° *Action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant mobile fermé.* — Nous supposerons, pour fixer les idées, que le courant indéfini XY (*fig.* 429) soit horizontal, et que le courant rectangulaire fermé *defg* soit mobile autour d'un axe vertical qui rencontre XY en un point L. — Le courant indéfini, dirigé de gauche à droite, sollicite, comme on vient de le voir, le courant descendant *de* vers la gauche et le courant ascendant *fg* vers la droite ; ces deux actions concordent pour faire tourner le cadre dans le sens indiqué par les flèches placées en *e* et en *f*. Il en est encore

ainsi de l'action exercée par le courant indéfini sur le courant horizontal *ef* ; ce dernier tend à se placer parallèlement à XY et dans le même sens que lui (570). Enfin, l'action exercée sur le côté *gd* tendrait à imprimer au cadre une rotation opposée, mais cette action est moins énergique que la précédente, parce que *gd* est plus éloigné du courant indéfini que *ef*. Il y aura donc équilibre stable, lorsque le plan du courant mobile sera parallèle au courant fixe, et que les deux courants seront de même sens dans leurs parties horizontales les plus rapprochées.

On vérifie cette conclusion au moyen de l'appareil qui est représenté par la figure 417. On dispose horizontalement, au-dessous du côté *ef*, un long fil de cuivre XY (*fig.* 429), dont les extremités communiquent aux deux pôles de la pile : on voit le courant *defg* s'orienter de manière que, dans le côté *ef*, le courant soit parallèle au courant XY et de même sens que lui.

On arriverait à un résultat semblable en remplaçant le rectangle *defg* par le cercle *adegb* (*fig.* 430). Ici encore, l'équilibre est stable quand le

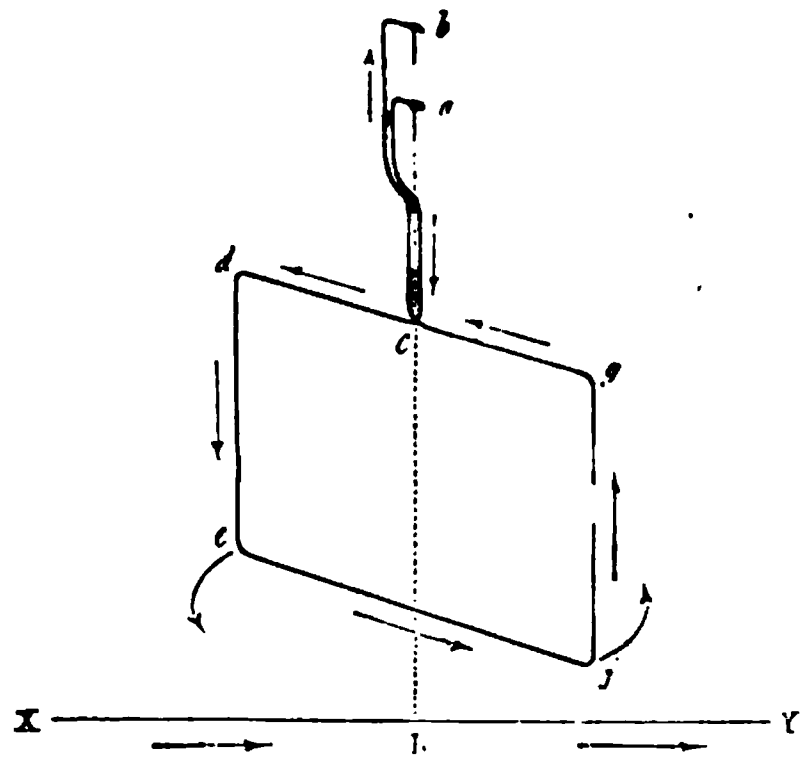


Fig. 429.

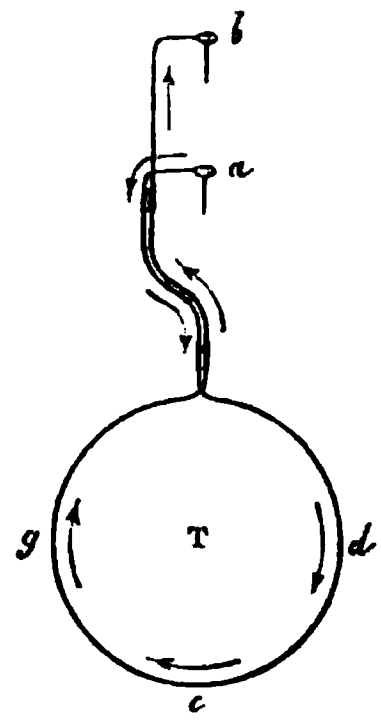


Fig. 430.

plan du courant mobile est parallèle au courant fixe, et que les deux courants sont de même sens dans leurs parties horizontales les plus rapprochées.

II. — ACTION DE LA TERRE SUR LES COURANTS.

574. **L'action que la terre exerce, soit sur un aimant, soit sur un courant mobile, peut être assimilée à celle d'un courant indéfini, perpendiculaire au méridien magnétique et dirigé de l'est à l'ouest.** — On voit d'abord que cette assimilation de l'action du globe à celle d'un courant est d'accord avec les phénomènes

que présente l'action de la terre sur l'aiguille aimantée, phénomènes que nous avons expliqués jusqu'ici en comparant la terre à un aimant. En effet, sous l'influence d'un courant rectiligne indéfini, l'aiguille aimantée se place perpendiculairement à la direction du courant, le pôle austral à gauche (558) : donc, si l'on assimile la terre à un courant dirigé de l'est à l'ouest et placé au-dessous de l'aiguille, la gauche de ce courant étant du côté du nord, le pôle austral de l'aiguille doit se tourner vers le nord, le pôle boréal vers le sud.

Nous allons constater maintenant, sur deux exemples, que cette assimilation explique également les effets produits par la terre sur les courants mobiles.

1° *Action de la terre sur un courant vertical, mobile autour d'un axe vertical.* — L'appareil représenté par la figure 431 se compose de deux coupes de cuivre rouge V, V', contenant de l'eau acidulée, et d'une colonne mé-

Fig. 431.

tallique H, isolée de ces coupes et terminée en *o* par une capsule à mercure. Un levier de bois T est suspendu, par la pointe *i*, sur la capsule *o* ; à l'une de ses extrémités est enroulé un fil métallique *a*, dont les bouts plongent dans le liquide des deux coupes. Le godet M communique avec le bord du vase V, le godet N avec le pied de la colonne H. — Les communications avec la pile étant établies comme l'indique la figure, le courant suit la route indiquée par les flèches, et l'on a, dans la plus grande branche du fil *a*, un courant vertical *ascendant*, mobile autour d'un axe ver-

tical. On voit l'équipage se mettre en mouvement, puis s'arrêter, après quelques oscillations, dans une position d'équilibre stable; à ce moment, on constate que le plan vertical passant par le fil *a* et par l'axe de rotation est *perpendiculaire au méridien magnétique*; de plus, le fil *a* se trouve à l'*ouest* de la colonne.

Or assimilons l'action de la terre à celle d'un courant rectiligne indéfini, perpendiculaire au méridien magnétique et dirigé de l'est à l'ouest.

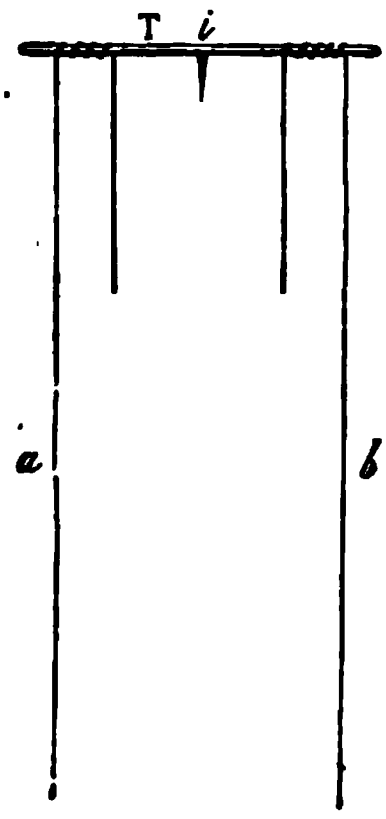


Fig. 432.

On a vu (573,1°) que l'action d'un courant horizontal indéfini sur un courant vertical ascendant tend à transporter celui-ci dans le même sens que le courant fixe; le courant ascendant *a*, dans l'expérience actuelle, tend donc à se porter vers l'ouest, et l'équilibre n'est réalisé que lorsque le plan passant par le fil et par l'axe de rotation est parallèle au courant indéfini, c'est-à-dire perpendiculaire au méridien magnétique. Si, au contraire, le courant *a* était *descendant*, le fil se porterait à l'*est* de l'axe de rotation.

Enfin, si l'on remplace l'équipage de la figure 431 par celui de la figure 432, dans lequel les courants qui traversent les grandes branches *a* et *b* sont ou *tous deux ascendants*, ou *tous deux descendants*, l'action exercée par la terre sur le courant *a* est équilibrée par l'action exercée sur le courant *b*: un semblable équipage est donc en équilibre indifférent, sous l'influence de la terre, dans toutes les positions possibles: c'est ce qu'on nomme un *système astatique*.

2° *Action de la terre sur un courant fermé.* — Reprenons l'appareil représenté par la figure 417, et suspendons aux coupes *a* et *b* le conducteur fermé *defg*. Les communications étant établies, on voit le cadre se placer *perpendiculairement au méridien magnétique* de telle manière, que, dans le fil horizontal inférieur, le courant soit dirigé de *l'est à l'ouest*. — Cette orientation s'explique encore en assimilant l'action de la terre à celle d'un courant rectiligne indéfini, perpendiculaire au méridien magnétitique et dirigé de l'est à l'ouest : car on a vu (573,2°) que, sous l'influence d'un courant indéfini horizontal, le plan du cadre s'oriente précisément de manière que le courant mobile et le courant fixe soient parallèles et de même sens dans leurs parties les plus rapprochées (*). — On arriverait aux mêmes résultats en remplaçant le rectangle *defg* par le cercle mobile de la figure 430.

(*) Il importe cependant de remarquer que, dans l'hypothèse du courant terrestre, l'orientation du cadre n'est due qu'aux actions exercées *sur les deux côtés verticaux*. On doit, en effet, considérer ce courant comme étant situé à une distance assez grande du cadre mobile, pour que les actions qu'il exerce sur les deux côtés horizontaux soient égales et contraires, et par conséquent s'équilibrent.

575. **Conducteurs astatiques.** — L'action de la terre intervient dans un grand nombre d'expériences d'électro-dynamique: par exemple, quand on fait agir un courant indéfini sur un courant fermé mobile autour d'un axe vertical (*fig.* 429), on a vu que le courant indéfini tend à placer le plan du conducteur mobile parallèlement à sa propre direction; mais, d'autre part, l'action de la terre tend à l'orienter perpendiculairement au méridien magnétique: aussi le circuit mobile prend-il toujours une position intermédiaire. On voit donc que, pour observer les effets produits par les actions électro-dynamiques, sans complication des actions terrestres, il est nécessaire de soustraire les appareils mobiles à l'action de la terre, c'est-à-dire de les rendre *astatiques*.

Les fils *a* et *b* (*fig.* 432), suspendus à l'appareil que représente la figure 431, constituent un équipage astatique, ainsi que nous l'avons expliqué. — Les figures 433 et 434 représentent deux conducteurs astatiques P et R, qui peuvent être substitués au conducteur mobile de la figure 417. — Dans le premier, P, on voit en effet que les deux fils verti-

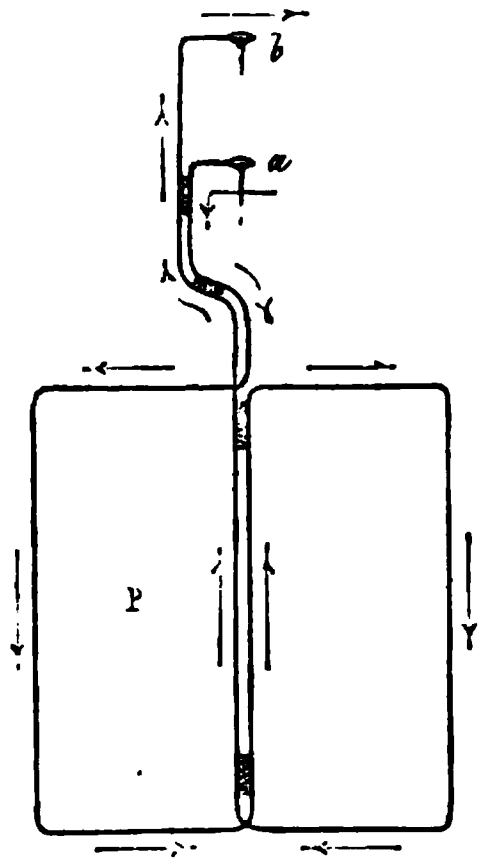


Fig. 433.

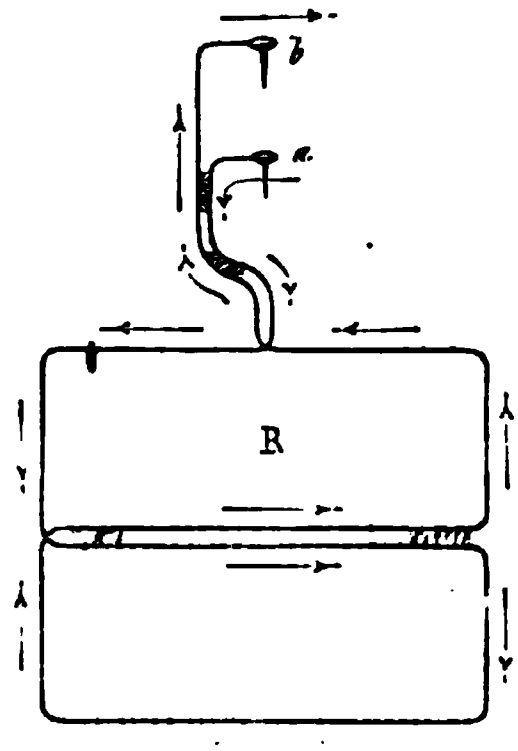


Fig. 434.

caux les plus éloignés de l'axe de rotation forment un système analogue à celui de la figure 432, et par conséquent astatique; il en est de même des deux fils voisins de l'axe. Quant aux portions horizontales de l'équipage, chacune d'elles tend, d'après le principe des courants croisés (570), à se placer parallèlement au courant terrestre et dans le même sens que lui: par suite, les actions exercées sur les deux moitiés du côté inférieur se neutralisent, de même que les actions exercées sur les deux moitiés du côté supérieur. — On verrait, par des considérations semblables, que l'équipage R est également astatique

III. — DES SOLÉNOÏDES. — THÉORIE DU MAGNÉTISME D'AMPÈRE.

576. **Solénoïdes.** — On nomme *solénoïdes* un système de courants circulaires égaux, de même sens, et dont les centres sont sur une même droite, à laquelle les plans des cercles sont perpendiculaires.

Pour réaliser un solénoïde, on prend un fil de cuivre entouré de soie, et on le contourne sur lui-même comme l'indique la figure 435; si un courant pénètre par la pointe *a* et sort par la pointe *b*, il parcourt dans le même sens toutes les parties circulaires du fil; quant aux parties qui sont dirigées suivant l'arête supérieure du cylindre, leur ensemble constitue deux courants rectilignes de même longueur, de même intensité et de sens contraire, dont les actions se neutralisent mutuellement: le système se comporte donc comme s'il se réduisait aux courants circulaires, c'est-à-dire comme un solénoïde.

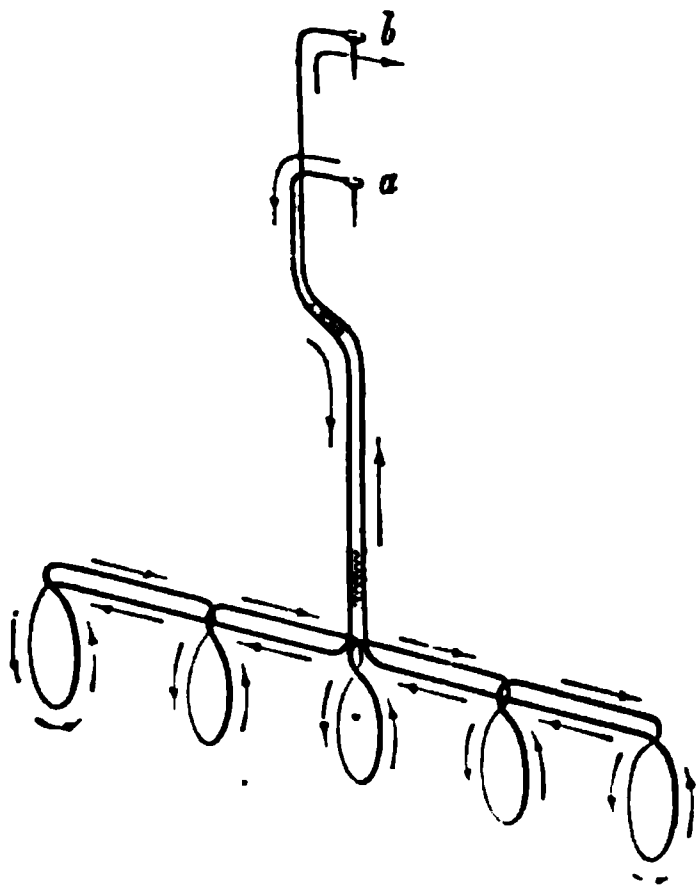


Fig. 435.

577. **Les solénoïdes jouissent de toutes les propriétés des aimants.** — Cette proposition sur laquelle Ampère a fondé toute une théorie du magnétisme, ressort d'un grand nombre d'expériences; nous décrirons les plus frappantes.

1° *Action de la terre sur un solénoïde.* — Suspendons, dans une position horizontale, le solénoïde de la figure 435 à l'appareil représenté par la figure 417 : il est alors mobile autour de la verticale passant par les deux points *a* et *b*, et le courant le traverse dans le sens indiqué par les flèches. Or on sait que la terre tend à orienter le plan de chaque cercle perpendiculairement au méridien magnétique, de manière que le courant marche de l'est à l'ouest dans la partie inférieure de la circonférence (574,2°); le solénoïde doit donc s'orienter de manière que son *axe*, c'est-à-dire la droite qui passe par les centres de tous les cercles, se place dans le plan du méridien magnétique. C'est l'orientation que prendrait une aiguille aimantée. — On appellera *pôle austral du solénoïde* l'extrémité qui se tourne vers le nord ; *pôle boréal*, l'extrémité qui se tourne vers le sud.

Il est d'ailleurs facile de définir les deux pôles du solénoïde par le sens

même des courants circulaires. — Imaginons, en effet, qu'un observateur se place sur le prolongement de l'axe horizontal du cylindre, d côté du pôle *austral*, et regarde le solénoïde dans la direction de cet axe : on voit que le sens des courants sera, pour cet observateur, *inverse de celui du mouvement des aiguilles d'une montre*. — Donc :

Un solénoïde horizontal s'oriente sous l'influence de la terre comme une aiguille aimantée; son pôle austral est l'extrémité en face de laquelle il faut se placer pour que le sens des courants circulaires paraisse inverse de celui du mouvement des aiguilles d'une montre.

2° *Action d'un courant rectiligne indéfini sur un solénoïde.* — Lorsqu'on soumet un solénoïde à l'action d'un courant indéfini, le plan de chacun des cercles tend à se placer parallèlement à ce courant (573,2°) ; toutes ces actions concourent donc à placer l'axe du solénoïde en croix avec le courant. De plus, cette position d'équilibre une fois atteinte, les courants circulaires sont, dans leurs parties les plus voisines du courant indéfini, de même sens que celui-ci, d'où il est facile de voir que le pôle austral du solénoïde se trouve à la gauche du courant indéfini. Donc :

Un solénoïde mobile, sollicité par un courant indéfini, tend à se placer en croix avec ce courant, le pôle austral se dirigeant vers la gauche.

3° *Actions mutuelles de deux solénoïdes.* — Suspendons encore un solénoïde à l'appareil représenté par la figure 417, et présentons à son pôle austral le pôle austral d'un autre solénoïde : supposons, pour plus de simplicité, que les axes des deux cylindres soient à peu près dans le prolongement l'un de l'autre. Alors, dans les cercles les plus voisins des extrémités en regard, les éléments correspondants sont sensiblement parallèles; et, comme les courants les traversent en sens contraire, ils se repoussent. Donc :

Dans deux solénoïdes, les pôles de même nom se repoussent. — On verrait de même que *les pôles de noms contraires s'attirent.*

4° *Action d'un aimant sur un solénoïde.* — En opérant d'une manière semblable, on constate que le pôle austral repousse le pôle austral d'un solénoïde ; que le pôle boréal repousse le pôle boréal. — Au contraire, le pôle austral de l'un attire le pôle boréal de l'autre, et réciproquement. — Ces résultats de l'expérience peuvent encore être prévus en se reportant à la direction du courant dans les cercles qui forment le solénoïde, et en appliquant la loi d'Ampère (558).

578. **Théorie du magnétisme d'Ampère.** — L'analogie complète que nous venons d'observer, entre les propriétés des solénoïdes et celles des aiguilles aimantées, a conduit Ampère à une théorie ingénieuse et remarquablement féconde, sur la constitution des aimants. Nous empruntons au *Traité d'électricité* de M. Gavarret l'exposé suivant des principes de cette théorie.

« La théorie nouvelle du magnétisme proposée par Ampère ne donne pas seulement une explication simple et facile de tous les phénomènes connus ; elle a encore le grand avantage de faire rentrer les actions des aimants naturels et artificiels, et celles de l'aimant terrestre lui-même, dans les lois de l'électricité dynamique.

« Pour lui, les fluides magnétiques n'existent pas ; les propriétés des aimants sont dues à des courants électriques qui circulent autour de leurs particules. Ces courants existent dans tous les corps influencés par l'action magnétique. Dans les substances magnétiques à l'état neutre, les *courants particulaires* n'ont pas tous la même orientation ; dirigés au hasard dans tous les plans possibles, ils se neutralisent mutuellement et ne peuvent révéler leur présence par aucun effet extérieur appréciable. — Pour qu'un corps magnétique soit aimanté, il faut et il suffit que, sous une influence quelconque, les courants particulaires soient tous ramenés à marcher dans le même sens et dans des plans parallèles. Dans un barreau aimanté, chaque série linéaire de molécules représente alors un petit solénoïde, dont l'axe est parallèle à l'axe du barreau ; le barreau tout entier est un faisceau de solénoïdes parallèles. Mais, dans chaque section transversale du barreau, les courants particulaires agissent comme un seul courant, égal à leur résultante et perpendiculaire à l'axe. L'ensemble de toutes ces résultantes constitue une série de courants circulaires, parallèles et de même sens ; le barreau aimanté est donc un véritable solénoïde.

« Cependant il existe une différence importante entre un solénoïde et un aimant :

« Dans le solénoïde, les pôles ou centres d'action sont *situés aux extrémités du cylindre*. — Dans l'aimant, au contraire, les pôles sont toujours situés dans son intérieur et *à une certaine distance des extrémités*.

« Ampère explique cette différence en disant que, dans un barreau aimanté, les courants particulaires réagissent les uns sur les autres. Par suite de cette action réciproque, les plans des courants d'un même aimant ne restent pas perpendiculaires à son axe, mais prennent une position d'autant plus inclinée sur cet axe qu'ils en sont plus éloignés, et qu'ils s'écartent davantage de son milieu. Les conséquences de cette obliquité des courants particulaires sont évidentes. D'abord, les centres d'action ou pôles ne peuvent plus être situés aux extrémités de l'aimant, mais doivent se rapprocher de son centre, d'une fraction de sa longueur d'autant plus grande que les courants ainsi inclinés sont plus nombreux et que leur inclinaison est plus grande. En second lieu, conformément aux résultats de l'expérience, plus l'épaisseur de l'aimant est considérable par rapport à sa longueur, plus les pôles doivent se rapprocher de son centre. — Dans un solénoïde, au contraire, par le fait de sa construction, les courants restent tous parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe ;

par suite, les pôles ou centres d'action doivent être situés exactement aux extrémités. »

* 579. **Application de la théorie d'Ampère à l'explication des phénomènes électro-magnétiques précédemment indiqués.** — Nous terminerons en montrant comment on peut, à l'aide de la théorie d'Ampère, expliquer facilement les phénomènes électro-magnétiques dans lesquels on produit la rotation d'un aimant sous l'action d'un courant, ou la rotation d'un courant sous l'action d'un aimant.

1° Reprenons l'expérience de Faraday (565,3°) dans laquelle on réalise la rotation continue d'un aimant sous l'action d'un courant.—Supposons, comme nous l'avons fait plus haut, que les courants soient dirigés du centre à la circonférence de la surface liquide, et que le pôle supérieur de l'aimant soit un pôle austral. Soit T (*fig.* 436) la section horizontale de la tige qui amène le courant, *mnm'n'* la section de l'aimant, TE, TE′ deux

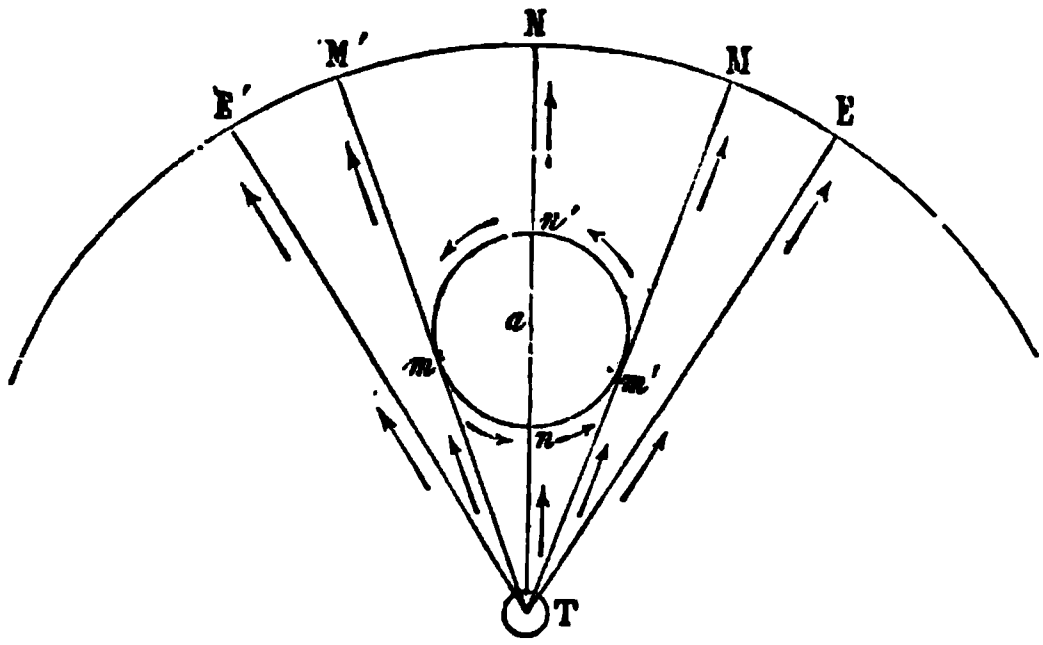


Fig. 436.

courants symétriques par rapport à la ligne des centres T*a*N, et situés en dehors de l'angle des tangentes TM et TM′. Si l'on assimile l'aimant à un solénoïde, on voit que les courants de ce solénoïde auront, pour un observateur qui regarderait l'aimant de haut en bas, un sens inverse de celui du mouvement des aiguilles d'une montre ; ce sens est indiqué par les flèches tracées autour du cercle *mnm'n'*. Dans ces conditions, les portions de ces courants qui sont les plus voisines du courant TE sont attirées par lui, tandis que les portions qui sont les plus voisines de TE′ sont repoussées par ce dernier courant; l'aimant doit donc s'éloigner de TE′ et s'approcher de TE. Le même raisonnement s'applique à deux courants quelconques, symétriquement placés par rapport à TN, et cela quelle que soit la position de l'aimant : donc l'aimant doit prendre un mouvement de rotation autour de la tige T et ce mouvement doit être dirigé dans le sens de celui des aiguilles d'une montre.

Le mouvement de rotation doit être inverse si les courants ont un sens

inverse à la surface du mercure, ou bien si l'aimant est placé en sens inverse. — Si l'on intervertit à la fois la position de l'aimant et la direction des courants, on retrouve le sens primitif de la rotation (*).

2° La même théorie explique le résultat de l'expérience de Faraday (566,3°), dans laquelle on produit la rotation continue d'un courant sous l'action d'un aimant. La figure 439 représente la section de l'appareil (*fig.* 416) par le plan vertical qui contient les deux conducteurs *b*, *c*, au moment où le barreau aimanté est introduit : soit *mnm'n'* (*fig.* 440) la

(*) Un raisonnement analogue permet d'expliquer, dans la théorie d'Ampère, une expérience un peu différente, due à Ampère lui-même, et dans laquelle on produit la rotation continue d'un aimant *autour de son propre axe*, sous l'influence d'un courant.

Faisons plonger le conducteur T (*fig.* 437) dans une petite capsule métallique pleine de mercure, fixée à la partie supérieure de l'aimant, et plaçons l'aimant au centre de l'éprouvette : l'aimant prendra un mouvement de rotation autour de son axe. — *Re-*

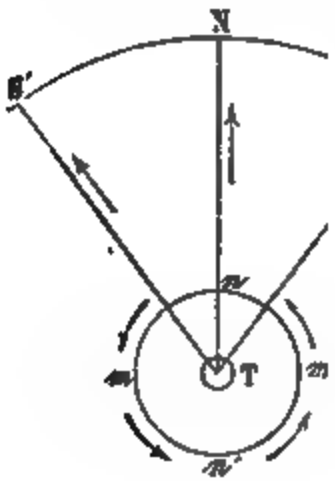


Fig. 438.

Fig. 437.

présentons par *mnm'n'* (*fig.* 438) la section du barreau aimanté, dont les courants particulaires ont la direction marquée par les flèches : le courant de la pile arrive par T et se dirige vers tous les points de la circonférence SNS. Si nous considérons, en particulier, l'un de ces courants horizontaux TN, on voit que la portion Tn de ce courant, qui traverse l'aimant lui-même, ne peut tendre à lui communiquer aucun mouvement; mais que la portion extérieure nN exerce une attraction sur *mn* et une répulsion *nm'*. ces actions concordent donc pour faire tourner l'aimant dans le sens *mnm'*. Il en est évidemment de même de toutes les portions des courants horizontaux qui sont extérieures au barreau, en sorte que l'aimant tourne dans un sens *inverse de celui de ses courants particulaires*.

section horizontale du barreau et mn' le diamètre suivant lequel son extrémité australe est coupée par le plan des conducteurs : le courant ascendant *b* éprouve une attraction de la part de $m'n'$ et une répulsion de la part de mn' c'est-à-dire qu'il est sollicité à passer derrière le plan de la figure : de même, *c* éprouve une répulsion de la part de $m'n$ et une attraction de la part de mn, c'est-à-dire qu'il tend à venir en avant du plan de la figure; ces quatre actions concourent à entraîner l'équipage dans le même sens ; il en est de même dans l'une quelconque des positions auxquelles il parvient pendant la rotation.

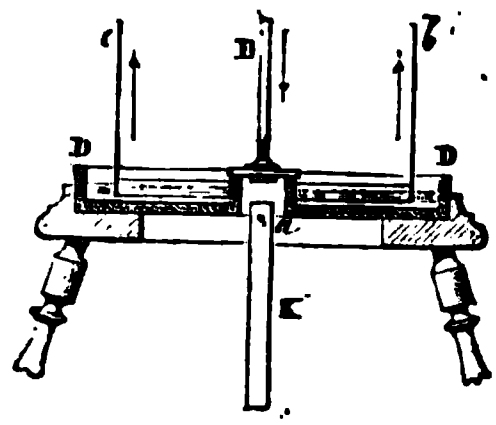


Fig. 439.

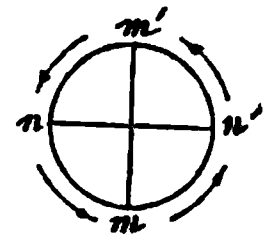


Fig. 440.

CHAPITRE VI

AIMANTATION PAR LES COURANTS. — TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE

I. — DÉVELOPPEMENT DU MAGNÉTISME PAR LES COURANTS ÉLECTRO-AIMANTS.

580. **Les courants électriques peuvent développer l'aimantation dans les corps magnétiques situés à une petite distance.** — La loi d'Ampère a établi qu'un courant exerce, sur un aimant situé dans son voisinage, une action qui tend à placer l'aimant en croix avec le courant, le pôle austral à gauche et le pôle boréal à droite. — Or, quelle que soit la façon dont on se représente la production des pôles dans un corps aimanté, qu'on veuille voir dans ce phénomène une séparation des deux fluides répandus dans les éléments magnétiques (489) ou une orientation spéciale des courants particulaires (578), on doit se demander si un courant ne pourrait pas agir sur un corps magnétique *non aimanté*, de façon à déterminer la formation de deux pôles, placés par rapport au courant comme l'indique la loi d'Ampère. — Les expériences suivantes prouvent qu'il en est ainsi.

Si l'on place un fil de fer, comme l'a fait Arago, en croix avec un conducteur traversé par un courant, on constate qu'il se développe dans ce fil une aimantation qui persiste tant que le courant passe : les pôles sont placés conformément à la loi d'Ampère. — De même, si l'on plonge dans la limaille de fer un fil métallique quelconque, et qu'on y fasse passer un courant, on voit les grains de limaille s'attacher à ce fil et s'attirer les uns les autres comme de petits aimants : l'attraction cesse dès qu'on ouvre le circuit.

Si l'on place, en croix avec un courant, une aiguille d'acier trempé non aimantée, on voit l'aimantation s'y développer avec lenteur, mais persister après le passage du courant. La force coercitive exerce donc ici l'action que nous avons déjà plusieurs fois constatée : si l'on attribue l'ai-

mantation à une orientation spéciale des courants particulaires, il faut admettre que cette orientation, une fois produite par le passage du courant, est maintenue par la force coercitive, alors même que le courant extérieur n'exerce plus aucune action sur ces courants.

581. **Aimantation de l'acier par les courants.** — Il est clair que l'intensité de l'aimantation développée dans une aiguille d'acier doit augmenter, si l'on multiplie autour d'elle les tours du fil que le courant traverse : Ampère eut l'idée de placer l'aiguille dans un tube de verre (*fig.* 441), et d'enrouler le fil en hélice, autour de ce tube.

Fig. 441.

Si l'hélice est *sinistrorsum*, c'est-à-dire si l'enroulement du fil a lieu de droite à gauche dans la moitié supérieure de chaque spire, comme le montre la figure 442, le pôle austral se fait à l'extrémité située du côté de l'entrée du courant ; si l'hélice est *dextrorsum*, c'est-à-dire si l'enroulement du fil a lieu de gauche à droite (*fig.* 441), le pôle austral se fait à l'extrémité située du côté de la sortie du courant. — On voit que ces deux résultats peuvent être compris dans un seul énoncé, le même que pour la détermination des pôles d'un solénoïde (577) : *le pôle austral se forme à l'extrémité devant laquelle il faut se placer pour que le sens des courants circulaires paraisse inverse de celui du mouvement des aiguilles d'une montre* (*).

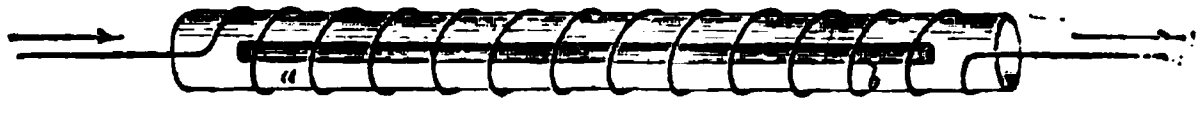


Fig. 442.

Enfin, pour produire des points conséquents dans une aiguille, il suffit de la placer dans un tube de verre sur lequel on aura enroulé le fil métallique successivement *dextrorsum* et *sinistrorsum* (*fig.* 443).

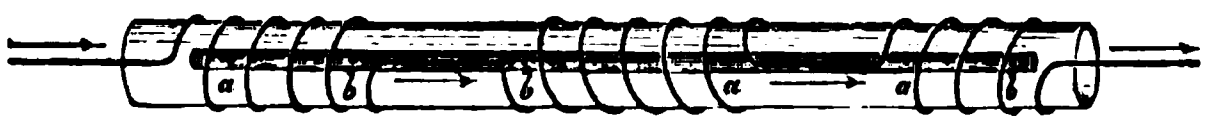


Fig. 443.

(*) Le procédé le plus puissant pour aimanter les barreaux d'acier de grandes dimensions est le suivant. Le barreau à aimanter est placé dans l'axe d'un anneau sur lequel s'enroule, un grand nombre de fois, un fil métallique traversé par un courant intense : il est d'ailleurs solidement assujetti entre deux forts aimants, par exemple entre deux électro-aimants semblables à ceux que nous allons étudier un peu plus loin. On exerce alors, avec l'anneau lui-même, des frictions énergiques et répétées sur le barreau, dans le sens de sa longueur, en ayant soin de passer le même nombre de fois sur chaque moitié.

* 582. **Aimantation de l'acier par les décharges d'électricité statique.** — Arago a constaté qu'on peut encore aimanter des aiguilles d'acier, placées dans l'axe d'hélices semblables aux précédentes, en faisant communiquer avec le sol l'une des extrémités de l'hélice, et tirant avec l'autre extrémité une série d'étincelles d'une machine électrique ordinaire. Le même effet peut être obtenu en déchargeant à travers l'hélice une batterie électrique (*).

Quelles que soient les conditions, encore assez peu connues, qui influent sur l'intensité du phénomène, les résultats précédents permettent de concevoir que des décharges comme celles de la foudre puissent aimanter des masses d'acier ou de fer situées au voisinage des points frappés, qu'elles puissent déplacer ou intervertir les pôles des aimants, *etc.*

583. **Aimantation du fer doux. — Électro-aimants.** — Soit un barreau de fer doux AB (*fig.* 444), placé dans l'axe d'une bobine C, sur laquelle on a enroulé un fil de cuivre couvert de soie. Si l'on fait passer un courant dans le fil, chaque tour de spire agit pour développer l'aimantation dans le fer doux : toutes ces actions s'exerçant dans le même sens, il se produit dans les extrémités du barreau AB deux pôles magnétiques d'une puissance très-grande : le pôle austral est à la gauche du courant. — Lorsque le fer dont est formé le barreau est parfaitement pur, et qu'on a eu soin d'éviter de lui donner la moindre force coercitive (**), l'aimantation s'y développe instantanément, dès que le fil est traversé par le courant ; elle cesse, instantanément aussi, dès que le courant est interrompu.

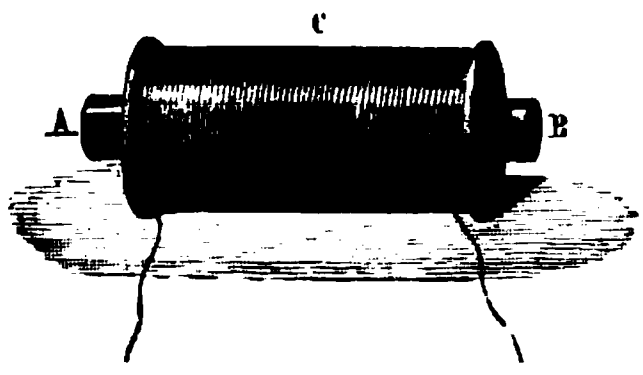


Fig. 444. — Électro-aimant.

Ces appareils ont reçu le nom d'*électro-aimants :* la force magnétique qui s'y développe temporairement peut dépasser en puissance celle des aimants permanents les plus énergiques.

584. **Électro-aimants en fer à cheval.** — Si l'on courbe en forme de fer à cheval la barre qui doit acquérir l'aimantation, et qu'on place les deux branches dans deux bobines A, B (*fig.* 445), sur lesquelles s'enroule un même fil de cuivre, il est clair qu'on peut toujours régler le sens de

(*) Les recherches faites sur ce sujet par Savary ont conduit à ce résultat général, qu'il faut toujours, pour que l'aimantation se développe, donner à la décharge une durée appréciable : ainsi, lorsqu'on réunit les armatures d'une batterie puissante par un fil de platine fin, des aiguilles d'acier placées en croix avec ce fil s'aimantent d'une manière sensible ; l'aimantation acquiert une valeur maximum pour une résistance déterminée du fil, et décroît pour toute résistance plus petite ou plus grande.

(**) Après avoir choisi du fer aussi pur que possible, et avoir donné aux barreaux la forme qu'ils doivent prendre, on les recuit à plusieurs reprises, et on achève de les travailler, non pas au marteau, mais à la lime : on fait ainsi disparaître sensiblement la force coercitive que l'écrouissage ne manque jamais de communiquer, même au fer le mieux purifié.

l'enroulement de façon que les actions des deux bobines concordent pour le développement du magnétisme dans la barre : ce résultat sera obtenu si l'enroulement est tel, que, en supposant la barre redressée et les deux bobines superposées par leurs bases supérieures, l'hélice de l'une soit la continuation de l'hélice de l'autre (c'est une hélice *sinistrorsum* dans la figure ci-contre). Or, s'il en est ainsi, au moment où l'on fera passer le courant, de X vers Y par exemple, les extrémités A et B deviendront, l'une un pôle austral, l'autre un pôle boréal; une pièce de fer doux K,

Fig. 445. — Électro-aimant en fer à cheval.

placée en présence de ces extrémités, éprouvera donc à la fois l'influence de l'un et de l'autre pôle; de ces deux actions concordantes résultera, comme pour les aimants ordinaires en forme de fer à cheval (*fig.* 373), une aimantation développée par influence dans le *contact* K, laquelle pourra lui permettre de soutenir un poids considérable. — Avec des électro-aimants de grandes dimensions, et en employant un courant assez intense, on peut charger le plateau M d'un poids qui dépasse 1000 kilogrammes, sans que le contact K se détache.

Au lieu de courber une barre en fer à cheval, on préfère souvent réunir, par une traverse de fer doux T (*fig.* 446), deux barreaux A et B placés parallèlement. — C'est toujours ainsi que sont construits, par exemple, les électro-aimants employés dans la télégraphie électrique : on parvient plus facilement à obtenir ces trois pièces de fer doux sans force coercitive, et l'électro-aimant fonctionne comme s'il ne contenait qu'une seule pièce de fer.

Fig. 446.

585. **Du choix des meilleures dimensions à donner aux fils des électro-aimants, selon l'usage auquel ces électro-aimants sont destinés.** — Dans un électro-aimant formé d'une barre de fer doux, placée dans l'axe d'une bobine couverte d'un fil métallique (*fig.* 444), on peut considérer les différents tours du fil comme exerçant tous sur le fer doux des actions sensiblement égales, si la bobine ne contient pas un trop grand nombre de couches de fil superposés. Dans ce cas, l'intensité magnétique développée dans le barreau croîtrait toujours avec le nombre des tours de spire du fil, si l'intensité du courant demeurait toujours constante. — Mais lorsqu'on augmente le nombre des tours du fil, on augmente sa résistance ; il faut remarquer d'ailleurs que, pour placer sur la bobine un grand nombre de tours, on est contraint d'employer des fils suffisamment fins, de sorte que cet accroissement de longueur et cette diminution de diamètre du fil doivent être toujours considérés comme diminuant l'intensité du courant. — On conçoit donc que, avec une pile déterminée, réunie au fil d'un électro-aimant par l'intermédiaire de conducteurs déterminés, il y ait avantage à augmenter, jusqu'à une certaine limite, la longueur du fil de l'électro-aimant lui-même, afin de pouvoir multiplier les tours, et qu'il y ait au contraire inconvénient à dépasser cette limite, à cause de l'affaiblissement qui en résulte dans l'intensité du courant.

La théorie démontre et l'expérience a vérifié la loi suivante : *Le maximum d'intensité, que peut communiquer à un électro-aimant une pile déterminée, correspond au cas où la résistance du fil de la bobine est égale à la résistance de la portion du circuit qui est extérieure à l'électro-aimant, y compris la résistance de la pile.*

On voit donc que la composition des bobines des électro-aimants doit être différente, selon les circonstances dans lesquelles ces appareils doivent être placés. — C'est ainsi, par exemple, qu'un électro-aimant qui est placé à l'une des stations d'une ligne télégraphique, et qui doit fonctionner sous l'influence du courant qui lui est transmis d'une autre station, à travers un fil ayant plusieurs centaines de kilomètres de longueur, doit être garni de bobines à fils très-fins et très-longs. On emploie en effet,

pour cet usage, des bobines portant environ 2000 tours de fil, et offrant une résistance qui représente à peu près 200 kilomètres du fil de la ligne. — Au contraire, d'autres électro-aimants, fonctionnant uniquement sous l'influence d'une pile placée dans le voisinage, sont munis de bobines à gros fils, qui ne portent qu'un très-petit nombre de tours.

586. **Magnétisme rémanent.** — Lorsqu'on emploie un électro-aimant pour fixer un *contact*, comme dans l'expérience indiquée par la figure 445, on observe souvent que le contact ne se détache pas au moment même où le courant est interrompu ; on peut quelquefois lui faire supporter ainsi indéfiniment le quart ou le tiers de la charge qu'il supportait pendant le passage du courant.

On a nommé *magnétisme rémanent* le magnétisme qui persiste dans un électro-aimant, sous l'influence du contact, après la suppression du courant ; cette persistance de l'aimantation a de graves inconvénients dans la plupart des usages auxquels on applique les électro-aimants. Elle est toujours d'autant plus faible que le fer est plus pur et mieux travaillé (*). — On diminue beaucoup l'intensité et la durée du magnétisme rémanent, en plaçant, entre l'électro-aimant et son contact, une plaque de bois ou de carton, ou même une feuille de papier. On arrive au même résultat en disposant un obstacle qui arrête le contact, à une petite distance de l'électro-aimant : c'est ce qu'on fait dans la plupart des appareils de télégraphie électrique.

* 587. **Appareil régulateur de la lumière électrique.** — Nous avons vu précédemment (552) que la distance des baguettes de charbon, entre lesquelles on produit la lumière électrique, tend à augmenter sans cesse; il est indispensable de faire intervenir un appareil régulateur qui maintienne les surfaces polaires à une distance sensiblement constante, si l'on veut que la lumière conserve la même intensité. — Foucault eut le premier, en France, l'idée de faire servir le courant lui-même à cet objet, en le faisant passer dans le fil d'un électro-aimant : nous décrirons succinctement l'appareil construit et perfectionné par M. Dubosq.

Les baguettes de charbon *p*, *n* (*fig.* 447) qui doivent constituer, l'une le pôle positif, l'autre le pôle négatif, sont fixées aux extrémités de deux tiges métalliques T, T′ : la tige T est munie, à sa partie inférieure, d'une crémaillère qui engrène avec les dents de la roue R; la tige T′ est supportée de même par une crémaillère qui passe dans la colonne creuse S, et qui vient engrener avec un pignon fixé à la même roue R. Cette roue R est assujettie à un ressort (**), qui tend toujours à lui imprimer un mouvement de rotation, de manière à faire monter la crémaillère de la tige T et à faire descendre en même temps la crémaillère S de la tige T′. Il en

(*) Voir la seconde note de la page 488.

(**) Ce ressort est placé dans un barillet, qui est masqué par la roue dans la figure ci-contre.

résulte que, si ces pièces étaient abandonnées à elles-mêmes, les deux charbons seraient toujours entraînés l'un vers l'autre, jusqu'au contact. Mais ce mouvement n'est possible qu'à la condition d'entraîner aussi le système des roues r, r' et de la vis sans fin v : le principe de l'appareil consiste précisément à rendre ce système immobile, tant que le courant passe convenablement de p en n, et à le laisser au contraire se mettre en mouvement, dès que le courant commence à s'affaiblir par l'usure des charbons. — Pour cela, on a placé dans le pied de l'appareil une bobine, dont le noyau est formé par un tube de fer doux, et dont le fil métallique est représenté par sa section en BB; l'une des extrémités de ce fil part du bouton P et est mise en communication avec le pôle positif de la pile; l'autre extrémité communique avec la plaque métallique qui forme la base supérieure de la bobine, et par suite avec la tige T, qui passe à frottement doux à travers cette plaque; on voit que, quand les charbons sont amenés au contact, ou situés encore à une faible distance, le courant arrivant par le bouton P parcourt le fil de la bobine, passe dans la tige T, franchit l'intervalle qui sépare p de n, et revient à la pile par la tige S et le bouton N. Or, le courant ayant pour effet de développer l'aimantation dans le tube de fer doux qui forme le noyau de la bobine, celui-ci attire l'anneau de fer doux k et la branche horizontale du levier L à laquelle l'anneau est fixé; la branche verticale de ce levier est alors mise en mouvement de gauche à droite, et vient buter contre une roue dentée horizontale, fixée à l'axe de la vis v. Tout le système des engrenages est ainsi arrêté, tant que le courant conserve son intensité, et les charbons restent fixes. — Au contraire, quand l'intensité du courant et celle de la lumière produite viennent à diminuer par l'usure des charbons, le magnétisme développé dans l'électro-aimant diminue, et il arrive un moment où le contact k, obéissant à l'action d'un petit ressort métallique qu'on aperçoit au-dessous de lui, s'éloigne de l'électro-aimant : la branche verticale du levier L s'écarte alors de la roue dentée qu'elle arrê-

Fig. 447. — Régulateur de la lumière électrique.

lait, et tout le système des engrenages, se mettant en mouvement, produit un rapprochement des surfaces polaires *p* et *n*. On conçoit qu'il résulte, de ce rapprochement même, une augmentation dans l'intensité du courant et dans la force magnétique de l'électro-aimant, de sorte que le contact *k* est bientôt attiré de nouveau, le système des engrenages s'arrête, et ainsi de suite (*).

Lorsqu'on emploie cet appareil, dans les expériences d'optique par exemple, pour projeter une lumière intense dans une direction déterminée, on place les deux charbons, comme le représente la figure 447, dans une boîte métallique rectangulaire, qui porte, dans l'une de ses faces verticales, une ouverture garnie d'un système de lentilles O. — A l'intérieur de la boîte, sur la face opposée à l'ouverture, est un miroir courbe M, qui renvoie encore vers les lentilles les rayons lumineux qu'il reçoit.

II. — TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE (**).

588. **Parties essentielles d'un télégraphe électrique.** — Tous les systèmes de télégraphie électrique aujourd'hui employés reposent essentiellement sur la transmission d'un certain nombre de signaux, formés chacun de courants intermittents et groupés d'une manière conventionnelle : de là, trois parties dans le télégraphe lui-même :

1° La *ligne télégraphique*, formée d'un système de conducteurs qui relient entre eux les deux points en correspondance, et qui transmettent le courant de la pile ;

2° Un *manipulateur*, ou instrument producteur des signaux, placé au point de départ de la dépêche ;

3° Un *récepteur*, ou instrument reproduisant les signaux, placé au point d'arrivée de la dépêche.

Nous décrirons successivement chacune de ces parties, en nous bornant aux systèmes qui sont aujourd'hui généralement adoptés sur les lignes télégraphiques de France.

589. **Lignes télégraphiques aériennes** ou **souterraines**. — La communication entre les postes d'une ligne télégraphique s'établit au moyen de fils métalliques, qui doivent être isolés aussi exactement que possible dans toute leur longueur. Ce sont, en général, des fils de fer *gal-*

(*) Le pignon de la roue R a un nombre de dents égal à la moitié du nombre des dents de la roue elle-même : il en résulte que, à chaque mouvement effectué par la roue, la pointe *n* descend d'une quantité qui est la moitié de celle dont le point *p* s'élève : l'observation ayant montré que le pôle positif s'use à peu près deux fois plus vite que le pôle négatif, la position de ces extrémités dans l'espace reste ainsi sensiblement constante.

(**) Nous empruntons une partie des détails qui suivent à l'ouvrage de M. Gavarret sur la *Télégraphie électrique :* plusieurs de nos figures d'appareils télégraphiques sont extraites de cet ouvrage.

zoniés, c'est-à-dire couverts d'une couche de zinc qui empêche l'oxydation de se propager au delà de la surface.

Ceux de ces fils qui traversent les campagnes ou qui suivent les lignes de chemins de fer sont soutenus par des poteaux de bois, et reposent sur de petits crochets métalliques fixés à des supports de porcelaines isolants (*fig.* 448).

Fig. 448.

Quand les fils doivent traverser une grande ville, on les fait passer généralement sous terre, pour les mettre à l'abri des accidents ou de la malveillance : on a soin alors de les isoler par une enveloppe de gutta-percha, et on les place le plus souvent le long des voûtes des égouts, où il est toujours facile de pénétrer, soit pour les visiter, soit pour les réparer au besoin. Lorsqu'on est obligé de placer ces conducteurs dans des tranchées, en contact avec le sol, on les protége, en outre, par une enveloppe métallique.

590. **Suppression du fil de retour.** — Du pôle positif de la pile part toujours un fil métallique qui se continue avec la ligne télégraphique elle-même; dans l'origine, on employait un second fil, c'est-à-dire une seconde ligne, dite *fil de retour*, pour ramener le courant au pôle négatif de la pile. M. Steinheil a montré, en 1837, que l'on peut supprimer ce fil de retour, pourvu qu'on fasse communiquer avec la terre, d'une part le pôle négatif de la pile, d'autre part l'autre extrémité de la ligne : il y a même à cela un avantage sensible, ainsi que nous allons le faire concevoir.

Soit d'abord une pile isolée, dont les extrémités ne communiquent pas entre elles. Les deux pôles acquièrent des tensions électriques égales et contraires; si on les faisait communiquer avec deux sphères de dimensions finies, chacune de ces sphères devant se mettre en équilibre de tension avec le pôle correspondant, il s'opérerait dans la pile une nouvelle production d'électricité, jusqu'à ce que la limite de tension fût atteinte; mais le mouvement électrique serait si rapide qu'il n'agirait même pas sur l'aiguille d'un galvanomètre placé sur son trajet. — Au contraire, si chacune des extrémités de cette pile est mise en communication avec un conducteur dont la surface puisse être considérée comme infinie par rapport à celle de la pile elle-même, le pôle positif fournira un véritable courant d'électricité positive, appréciable au galvanomètre : le pôle négatif fournira de même un courant d'électricité négative, et cela jusqu'à l'entier épuisement de la pile. C'est ce que les expériences de M. Guillemin ont démontré d'une manière complète.

Or, pour la correspondance télégraphique, on établit, comme nous l'avons dit, un fil métallique continu entre le pôle positif de la pile et le

point avec lequel on veut établir la correspondance, et l'on fait communiquer l'autre extrémité de ce conducteur avec la terre ; on met également en communication avec la terre le pôle négatif de la pile. Les couches du sol jouent le rôle d'un conducteur de surface infinie, absorbant l'électricité à mesure qu'elle est produite, et permettant à la pile de fonctionner jusqu'à son épuisement complet (*).

Il est facile de concevoir enfin que la terre n'oppose à la propagation de ces courants qu'une résistance très-petite, comparativement à celle d'un fil de retour de longueur considérable : l'expérience montre, en effet, que *l'intensité du courant est presque double de ce qu'elle serait avec un fil de retour*.

591. **Piles employées dans la télégraphie électrique.** — Le service des lignes télégraphiques se fait presque exclusivement aujourd'hui, en France, avec des piles qui ne sont que des modifications de la pile de Daniell, plus ou moins avantageuses pour la pratique.

La pile de Bunsen, qui a une intensité beaucoup plus grande, n'est employée que dans des cas exceptionnels, et quand la correspondance exige un courant d'une grande puissance. — Elle est généralement abandonnée pour le service ordinaire, à cause de l'entretien qu'elle exige, et des vapeurs acides qu'elle laisse dégager (**).

592. **Télégraphe à cadran de M. Breguet.** — Le télégraphe à cadran de M. Breguet est celui que les administrations des chemins de fer emploient ordinairement, en France, pour leurs correspondances particulières.

Manipulateur. — La pièce essentielle du manipulateur est un disque de cuivre horizontal E (*fig.* 449), qu'on fait tourner sur lui-même autour de son centre au moyen de la manivelle M ; sur sa face inférieure est pra-

(*) Il serait inexact de dire que le courant, après avoir traversé la ligne télégraphique, est ramené à la pile par la terre, comme par un conducteur ordinaire : tout au plus cette opinion serait-elle soutenable si les points où les fils plongent dans le sol étaient à une très-petite distance. Ces points sont séparés, en général, par une distance d'un grand nombre de kilomètres, et il est impossible d'admettre que la propagation de l'électricité se fasse comme dans un circuit fermé.

(**) On doit à M. Marié-Davy une pile qui est destinée au service télégraphique, et qui présente des avantages réels. Elle peut être considérée comme différant principalement de la pile de Daniell en ce que le sulfate de cuivre est remplacé par du sulfate de mercure. — Il est aisé de concevoir en quoi cette substitution est avantageuse. Dans la pile de Daniell, quand elle a fonctionné assez longtemps, il se produit toujours une filtration lente du sulfate de cuivre, au travers du vase poreux qui devrait séparer les deux liquides : ce sulfate de cuivre étant décomposable par le zinc, il se dépose du cuivre en certains points de la lame de zinc, qui devient ainsi hétérogène et est attaquée d'une manière continue par l'acide, même dans les moments où le circuit intérieur n'est pas fermé. Au contraire, lorsqu'on emploie le sulfate de mercure, c'est du mercure qui se dépose sur le zinc, et qui a pour effet d'entretenir l'amalgamation. — Enfin, dans la pile de M. Marié, le conducteur qui plonge dans le sulfate de mercure ne peut plus être une lame de cuivre, qui serait attaquée : c'est une plaque de charbon de cornue, sur laquelle se rend le mercure mis en liberté par le courant. Ce métal coule au fond du vase poreux, où l'on peut ensuite le recueillir.

tiquée une rainure sinueuse, indiquée sur la figure par des traits ponctués, et offrant treize sinuosités saillantes et treize sinuosités rentrantes, en tout vingt-six alternatives : dans cette rainure, s'engage une pièce métallique verticale *a*, qui est fixée à l'extrémité du levier OG mobile autour de l'axe O; l'autre extrémité de ce levier est terminée par une petite lame métallique flexible, située dans l'intervalle de deux pointes métalliques *p*, *p'*. Lorsqu'on imprime au disque un mouvement de rotation, la pièce *a* suit les sinuosités de la rainure, et, cette extrémité du levier s'éloignant et se rapprochant successivement du centre du disque, la lame flexible qui est à l'autre extrémité vient toucher alternativement la pointe *p'* et la pointe *p*. — Faisons communiquer la pointe *p'* avec le pôle positif de la pile, et l'axe du disque avec la ligne télégraphique (cette dernière communication est indiquée sur la figure par une ligne ponctuée) : chaque fois que *a* arrivera à une sinuosité saillante, la lame viendra toucher *p'*, le courant passera

Fig. 449.

Fig. 450. — Manipulateur du télégraphe à cadran.

sur le disque, et de là sur la ligne; chaque fois que *a* sera dans une sinuosité rentrante, la lame viendra toucher *p*, et le courant sera interrompu. Or, au-dessous de la manivelle M, est une plaque circulaire P, fixée à la planche qui supporte le manipulateur, et dont le contour est partagé en

vingt-six secteurs égaux, portant les vingt-cinq lettres de l'alphabet et une *croix* ou signe conventionnel (*) ; au milieu de chacun de ces secteurs, correspond une petite encoche, dans laquelle peut s'arrêter une goupille fixée au-dessous de la manivelle : on voit alors la lettre ou le signe que porte la case correspondante du cadran, à travers une fenêtre ménagée dans la manivelle.

Lorsque la manivelle est placée sur la croix, le levier G est en contact avec *p*, et le courant est interrompu : si on la transporte de là sur une lettre de rang quelconque, le nombre total des établissements et des interruptions du courant sera précisément égal au rang même de cette lettre : l'opérateur s'arrête un moment sur la lettre qu'il veut indiquer, et passe ensuite aux lettres suivantes, en faisant toujours tourner la manivelle dans le même sens. — La croix lui sert à indiquer qu'il passe d'un mot à un autre. Lorsqu'il veut indiquer qu'il s'agit, non plus des lettres, mais des chiffres qui sont placés en dehors, dans des secteurs correspondants (*fig.* 450), il fait faire un tour complet à la manivelle, de la croix à la croix (**).

Récepteur. — Le récepteur comprend, comme partie essentielle, un *échappement* formé d'un système de deux roues dentées, parallèles et fixées sur le même axe, R, R' (*fig.* 451), qui doit exécuter les mêmes mouvements que le disque mobile du manipulateur. Chacune de ces roues porte treize dents, et les dents de l'une alternent avec celles de l'autre : de là résulte que l'intervalle de deux dents successives de l'échappement est d'un vingt-sixième de circonférence. Un mouvement d'horlogerie, qu'on a supprimé ici pour ne pas compliquer la figure, tend à faire tourner toujours l'axe de l'échappement ; c'est sur cet axe qu'est portée l'aiguille qui parcourt le cadran placé à l'extérieur de la boîte du récepteur (*fig.* 452). Or, au-dessous de l'échappement est un arrêt G, qui, par de

Fig. 451.

(*) Dans la figure 449, cette plaque P est évidée en son milieu, et laisse voir le disque E ; on n'en a d'ailleurs indiqué qu'une partie. — Dans la figure 450, c'est une plaque pleine, qui cache le disque placé au-dessous d'elle : on en a enlevé une portion sur la gauche du dessin, pour montrer le disque et le levier G.

(**) Le manipulateur représenté par la figure 450 porte, en outre, un certain nombre de pièces, qui sont destinées à faciliter le service, et dont il est aisé de comprendre l'usage. — Il est important en effet qu'une station télégraphique puisse successivement envoyer et recevoir des dépêches par le fil qui l'unit, soit à la station de droite ; soit à la station de gauche, et cela avec le moins de perte de temps possible. Pour

petits mouvements alternatifs en avant et en arrière, autour de l'axe du cylindre *aa* auquel il est fixé, peut venir arrêter successivement une dent de la roue antérieure et une dent de la roue postérieure : à chacun de ces mouvements, l'échappement tourne d'un vingt-sixième de circonférence, et l'aiguille extérieure avance d'une lettre sur son cadran. — Il nous reste à montrer comment ces mouvements de l'arrêt G sont commandés par les alternatives de passage et d'interruption du courant.

Le cylindre *aa* porte une fourchette F, à cheval sur une goupille *g*, qui est fixée à une tige verticale *q* supportée elle-même par la palette de fer doux P. Cette palette P peut tourner autour d'un axe passant par les pointes des deux vis *v*, *v*, et l'étendue de ses mouvements est limitée par deux autres vis implantées dans les branches de la fourche *f*, entre lesquelles passe la tige *q*. En face de la palette, sont placées les surfaces polaires d'un électro-aimant en fer à cheval E, dont le fil communique d'une part avec la ligne, d'autre part avec la terre. — Partons maintenant du moment où la manivelle du manipulateur et l'aiguille du récepteur sont placées toutes deux sur la croix : le courant n'arrive pas au récepteur, et par suite, la palette étant maintenue verticale par le ressort à boudin *r*, l'arrêt G est en prise avec une dent de la roue postérieure de l'échappement. Si alors la manivelle du manipulateur est portée sur la lettre A, le courant arrive à l'électro-aimant, la palette P est attirée, la cela, on établit une communication permanente entre la pointe métallique *p*, sur laquelle s'appuie le levier G quand le manipulateur est à la croix, et le récepteur du poste (cette communication est indiquée, sur la figure 450, par une ligne ponctuée). En outre, on installe, aux deux coins symétriques de la planchette, deux *commutateurs* N et N', en forme de leviers coudés, dont les axes de rotation métalliques communiquent l'un avec la ligne de gauche, l'autre avec la ligne de droite. Ces deux commutateurs et leurs communications étant exactement semblables, nous nous occuperons seulement de l'un d'eux, de celui de gauche par exemple.

En prenant à la main la poignée N, on peut amener à volonté l'autre branche du levier sur l'une des trois pièces métalliques S, *r*, C. — Lorsqu'elle est placée en S, la ligne de gauche communique par le commutateur avec une sonnerie dont le tintement, qui se produit à l'instant où il arrive un courant, avertit l'employé que cette ligne demande à lui transmettre une dépêche. Cette position du commutateur est donc la position d'*attente* : c'est celle dans laquelle le place l'employé, quand il s'éloigne de son appareil. — Quand l'employé, averti par la sonnerie, veut recevoir la dépêche annoncée, il pousse le commutateur sur la pièce *r* qui communique avec le cadran métallique et le levier G, et par suite avec le récepteur si la manivelle est sur la croix : le commutateur est dans la position de *réception*. — C'est aussi dans cette dernière position que le commutateur doit être laissé lorsqu'on veut envoyer une dépêche sur la ligne de gauche : il est facile de voir en effet que les communications sont alors établies comme l'indique la figure 449. — Enfin, si le commutateur N est amené sur C, et que le commutateur N' soit amené en même temps sur le point correspondant D de la plaque métallique CD, un courant arrivant par la ligne de gauche passe directement sur la ligne de droite, sans passer par le récepteur du poste : c'est la position de *communication directe*, celle dans laquelle l'employé place son appareil, quand des signaux particuliers lui ont fait savoir qu'il doit laisser passer la dépêche sans la recueillir.

Le commutateur N' sert, exactement de la même manière, pour entretenir la correspondance avec la ligne de droite.

tige *q* est portée en arrière, et par suite l'arrêt G abandonne la dent de la roue postérieure, pour venir arrêter au passage la dent suivante de la roue antérieure : l'échappement a fait un vingt-sixième de tour, et l'ai-

1

Fig. 452. — Récepteur du télégraphe à cadran.

guille extérieure est venue sur la lettre A. Si la manivelle du manipulateur est portée sur la lettre B, le courant est interrompu dans le fil de l'électro-aimant, et la palette P est ramenée par le ressort *r* à sa position primitive ; l'arrêt G est donc porté en arrière, et vient heurter la dent suivante de la roue postérieure : l'échappement a fait encore un vingt-sixième de tour, l'aiguille est venue sur la lettre B, et ainsi de suite. — On voit ainsi que tous les signes indiqués par la manivelle du manipulateur sont instantanément reproduits par l'aiguille du récepteur.

593. **Télégraphe de Morse.** — Le système télégraphique de M. Morse, inventé en Amérique, s'est rapidement répandu dans le monde entier : c'est aujourd'hui l'un des plus employés.

Manipulateur. — Le manipulateur se compose d'un levier métallique k (*fig.* 453), qui est mobile autour d'un axe S communiquant avec la ligne, comme l'indique la figure. On manœuvre le levier en appuyant avec la main sur la poignée de bois P : la pointe métallique *t* vient alors porter sur la pièce métallique *b* qui communique avec le pôle positif de la pile . donc, tant que dure la pression exercée sur la poignée P, le courant de la pile passe

Fig. 453.

sur la ligne. Au contraire, dès que cette pression cesse, un ressort r relève le levier, et le courant est interrompu. — En faisant varier la durée de chacun des contacts de la pointe *t* avec *b*, et la durée des intervalles qui séparent les contacts consécutifs, on peut envoyer ainsi sur la ligne une série de courants discontinus, dont on règle à volonté le rhythme et la durée (*).

Fig. 454. — Manipulateur du télégraphe de Morse.

Récepteur. — Les mouvements du levier du manipulateur sont fidèlement reproduits par un autre levier AOD (*fig.* 455) qui est la pièce principale du récepteur. Ce levier est mobile autour d'un axe O ; sa branche OA porte une plaque de fer A, placée au-dessus d'un électro-aimant E, dont le fil communique d'une part avec la ligne, d'autre part avec la terre. Au-

Fig. 455.

dessus de l'extrémité de l'autre bras de levier, passe une bande de papier XY, qui est entraînée d'un mouvement uniforme entre deux cylindres horizontaux *b*, *a*, mobiles autour de leurs axes, et mis en mouvement par un mécanisme d'horlogerie contenu dans la boîte B (*fig.* 456). — Tant

(*) Le manipulateur représenté par la figure 454 porte, outre les deux boutons B et C, qui servent à établir la communication de *b* avec la pile, et celle de S avec la ligne, un troisième bouton A qui est en communication avec la pièce métallique *a*. Ce bouton, qui reçoit un fil métallique se rendant au récepteur du poste, sert, quand le manipulateur est au repos, à faire parvenir dans ce récepteur les courants qui peuvent arriver par le fil de la ligne. On voit, en effet, que le levier métallique établit alors la communication entre C et A : le manipulateur se place donc de lui-même, quand on abandonne la poignée, dans la position de *réception*.

qu'il n'y a pas de courant transmis au fil de l'électro-aimant, le ressort à boudin *r* maintient le bras du levier OA relevé. Au contraire, dès que le courant passe, et tant qu'il continue de passer, l'électro-aimant, jouant le

Fig. 456. — Récepteur du télégraphe de Morse.

même rôle que la main dans le manipulateur, abaisse le bras de levier OA : par suite, l'extrémité D du levier (*fig.* 455) soulève la bande de papier et vient l'appuyer sur une petite molette *m*, qui est toujours couverte d'encre d'imprimerie ; cette molette imprime ainsi sur le papier un trait dont la longueur dépend de la durée du courant (*).

Pour que ces oscillations du levier n'aient qu'une petite amplitude, on place au-dessus et au-dessous du prolongement de OA deux vis fixes, *f* et *g* ; la première *f* est réglée de manière que la pièce de fer A s'éloigne peu de l'électro-aimant pendant les interruptions du courant ; la seconde *g*, de manière que A puisse s'approcher très-près de l'électro-aimant,

(*) L'emploi de la molette couverte d'encre grasse a été introduit par MM. Digney frères : avant eux, l'extrémité du levier D portait une pointe sèche, qui venait refouler le papier dans une rainure placée au-dessus de lui et y produire ainsi un gaufrage : la force nécessaire à la production du gaufrage exigeant que le courant eût une intensité beaucoup plus considérable.

sans cependant le toucher, afin d'éviter la production du magnétisme rémanent (586) (*).

On est convenu de n'employer que deux traces différentes : le *point* (·), qui correspond à un courant presque instantané, et le *trait* (—), auquel on donne toujours la même longueur et qui correspond à un courant de durée déterminée. — C'est en combinant de diverses façons ces deux traces, qu'on représente toutes les lettres de l'alphabet, les chiffres, les lignes de ponctuation, et les signaux réglementaires de la correspondance. La figure 457 indique les conventions adoptées pour les diverses lettres de l'alphabet : pour composer une phrase, on laisse, entre les

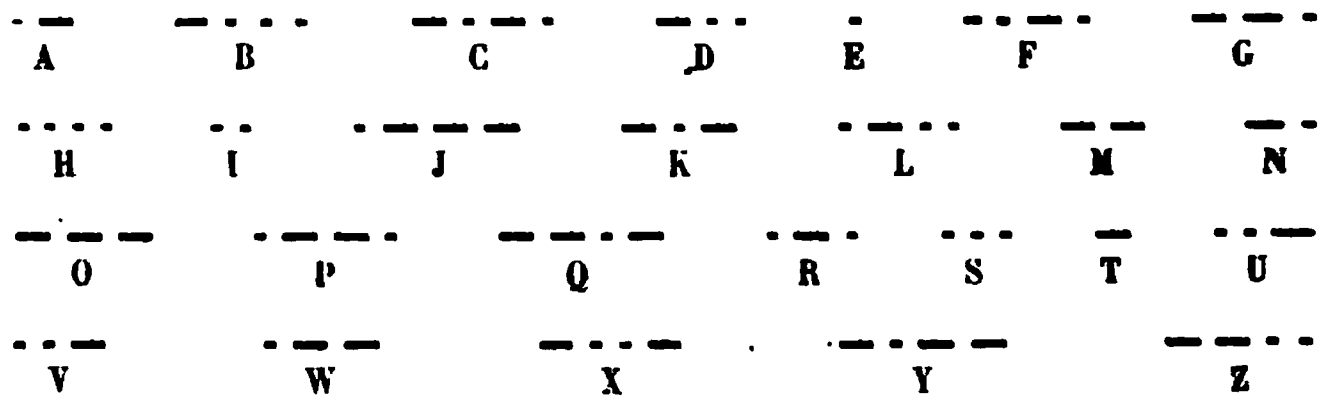


Fig. 457. — Alphabet du système Morse.

lettres successives qui composent chaque mot, un intervalle plus grand que celui qui existe entre les signaux formant une même lettre. Ainsi le nom de l'inventeur Morse s'écrirait comme l'indique la figure 458. —

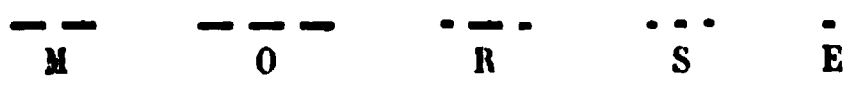


Fig. 458.

Enfin les mots d'une même phrase sont séparés les uns des autres par des intervalles plus grands encore:

L'appareil étant construit avec toute la précision que la pratique a permis d'atteindre, on arrive à passer jusqu'à vingt dépêches par heure : la dépêche étant de vingt mots, et les mots étant comptés de cinq lettres en moyenne, cette vitesse correspond à une trentaine de lettres ou à une centaine de traits par minute. Avec une grande habitude, certains employés arrivent à une vitesse presque double.

Ce système est aujourd'hui le plus répandu : il sert pour la transmis-

(*) Le récepteur représenté par la figure 456 porte quelques autres pièces accessoires, dont il est facile de comprendre le rôle. — La roue R, qui est très-légère et très-mobile, porte enroulée la bande de papier qui doit recevoir la dépêche : celle-ci passe dans une fourchette fixée à la partie supérieure de la boîte B, puis sur un galet C, et enfin elle est entraînée entre les deux cylindres *b*, *a*. Le mouvement d'horlogerie qui fait tourner *b* est placé dans la boîte ; le levier qu'on aperçoit en avant de la figure sert à l'arrêter ou à le mettre en marche, suivant qu'on le pousse à droite ou à gauche.

sion des dépêches des particuliers ou des gouvernements, et convient d'ailleurs aussi bien aux *dépêches chiffrées*, puisqu'on peut donner aux chiffres ou aux lettres telle signification mystérieuse que l'on veut. — Il paraît exiger, au premier abord, une longue expérience : ceux qui l'ont manœuvré quelque temps y acquièrent cependant une telle habitude, qu'il leur suffit d'écouter les mouvements du levier pour comprendre la dépêche *au son*, et que la lecture de la bande n'est plus ensuite pour eux qu'une vérification.

594. **Télégraphe imprimant de Hughes.** — Le télégraphe à cadran, à côté de l'avantage d'employer les lettres ordinaires et de pouvoir être manié presque sans aucun apprentissage préalable, a l'inconvénient ne laisser aucune trace de la dépêche. En revanche, le télégraphe de Morse, qui écrit lui-même la dépêche, l'écrit en caractères qui ne sont facilement déchiffrables qu'avec une grande habitude. — On doit à M. Hughes, de New-York, la réalisation d'un appareil qui imprime la dépêche en caractères ordinaires, en un temps bien moindre que le télégraphe à cadran ne l'épelle.

Chaque appareil comprend un clavier dont les touches portent les diverses lettres de l'alphabet, et une petite roue, dite *roue des types*, qui tourne sur elle-même d'un mouvement continu, et porte également sur son contour les lettres de l'alphabet. Au-dessous de la roue, glisse une bande de papier. Au moment où l'on applique le doigt sur l'une des touches du clavier, un ressort soulève cette bande de papier et vient l'appliquer sur la route, à l'instant précis où se présente la lettre correspondante : cette impression dure moins d'un centième de seconde. Si maintenant il y a parfaite concordance entre les mouvements des roues des types, pour les deux appareils placés aux extrémités d'une même ligne télégraphique, le courant lancé sur la ligne, à chaque contact des doigts sur le clavier de départ, produit un effet correspondant à la station d'arrivée, et donne comme résultat l'impression des mêmes caractères.

Ce *synchronisme* des deux appareils, qu'il fallait concilier avec une vitesse très-grande, constituait la principale difficulté : elle a été résolue par M. Hughes avec une perfection absolue, au moyen d'un mécanisme trop complexe pour qu'il nous soit possible de le décrire : l'envoi de chaque signal a d'ailleurs pour effet de maintenir ce synchronisme, une fois qu'il est établi.

Le télégraphe de M. Hughes peut envoyer, par heure, de quarante à soixante dépêches de vingt mots, selon la dextérité de l'opérateur.

595. **Pantélégraphe Caselli.** — L'appareil qui a été imaginé par l'abbé Caselli, et auquel il a donné le nom de *pantélégraphe*, résout un problème dont la solution semblerait presque impossible, celui de transmettre, par la télégraphie, l'autographe même de l'expéditeur, de manière que son écriture et sa signature puissent être reconnues à la station d'ar-

rivée. — Nous nous contenterons encore d'en indiquer succinctement le principe.

La dépêche est écrite par l'expéditeur lui-même, avec une encre grasse, sur une feuille d'étain : cette feuille est alors placée sur une table de métal E présentant une courbure cylindrique (*fig.* 459). — Sur cette

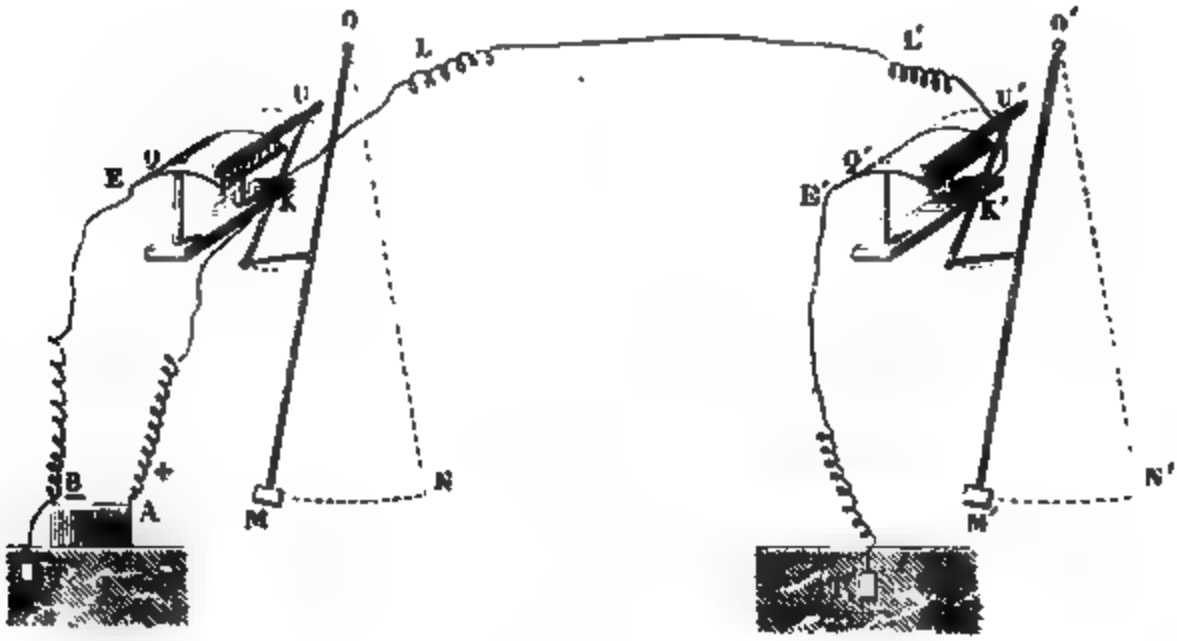


Fig. 459.

table, se meut une petite pointe métallique P, qui exécute les mêmes mouvements que si l'on voulait rayer la feuille d'étain en travers, sur

Fig. 460.

toute sa surface. Ces mouvements s'obtiennent, d'une part, au moyen d'un pendule OM, relié à la pointe comme l'indique la figure 460, de fa-

çon que, l'extrémité du pendule décrivant l'arc de cercle MN, la pointe décrive, perpendiculairement à l'axe de la table métallique, l'arc PQ; d'autre part au moyen d'un pas de vis, qui est indiqué en UU dans la figure 459, et qui fait avancer la pointe d'une petite quantité, dans le sens de l'axe de la table, entre deux oscillations consécutives du pendule. — La bielle métallique qui porte la pointe P communique en K avec le pôle positif A d'une pile et avec le fil de ligne LL′; la table E communique avec le pôle négatif B de la pile et avec la terre T. — De là résulte que, tant que la pointe P appuie sur les parties de la feuille d'étain qui ne sont pas couvertes d'encre, le courant circule, presque en totalité, dans le circuit AKPEB, qui lui offre une résistance beaucoup moins considérable que le fil de ligne. Au contraire, quand la pointe P vient toucher les parties de la feuille d'étain qui sont couvertes d'encre grasse, le courant ne peut plus passer de la pointe à la table E : il passe alors sur le fil de ligne LL′ qui l'amène à un autre appareil, situé à la station d'arrivée, et semblable à celui de la station de départ. Le fil de ligne aboutit de même, dans cet appareil, à l'axe K′ qui porte la pointe de fer P′, et la table E′ reçoit une feuille de papier, humectée d'une solution de cyanure jaune de potassium ; toutes les fois que le courant passe de la pointe de fer P′ dans la table E′ pour se rendre à la terre T′, il décompose le cyanure jaune, et laisse une trace de bleu de Prusse, dont la longueur est égale à l'arc parcouru par la pointe pendant le passage du courant. —

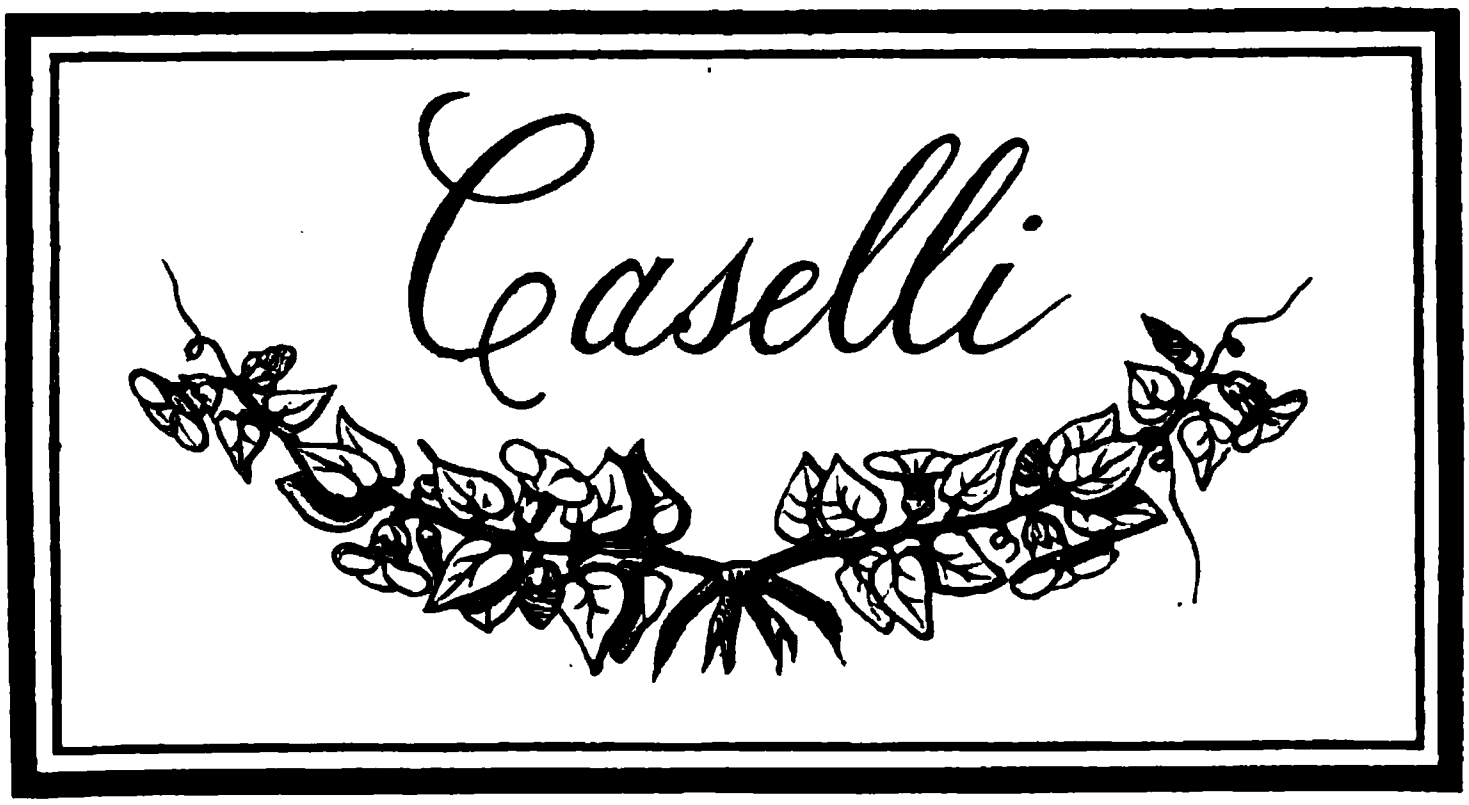


Fig. 461.

La pointe avance d'ailleurs dans le sens de l'axe de la table, à chaque oscillation du pendule, comme dans l'appareil de la station de départ.

On voit donc que, si les mouvements des deux pendules sont rigoureusement synchrones, l'appareil récepteur fournira une série de petits

traits parallèles, dont la superposition produira, en définitive, l'aspect exact des caractères tracés à l'encre par l'expéditeur. Les figures 461 et 462 montrent comment on peut reproduire de cette manière, non-seulement des caractères d'écriture, mais un dessin quelconque, des traits

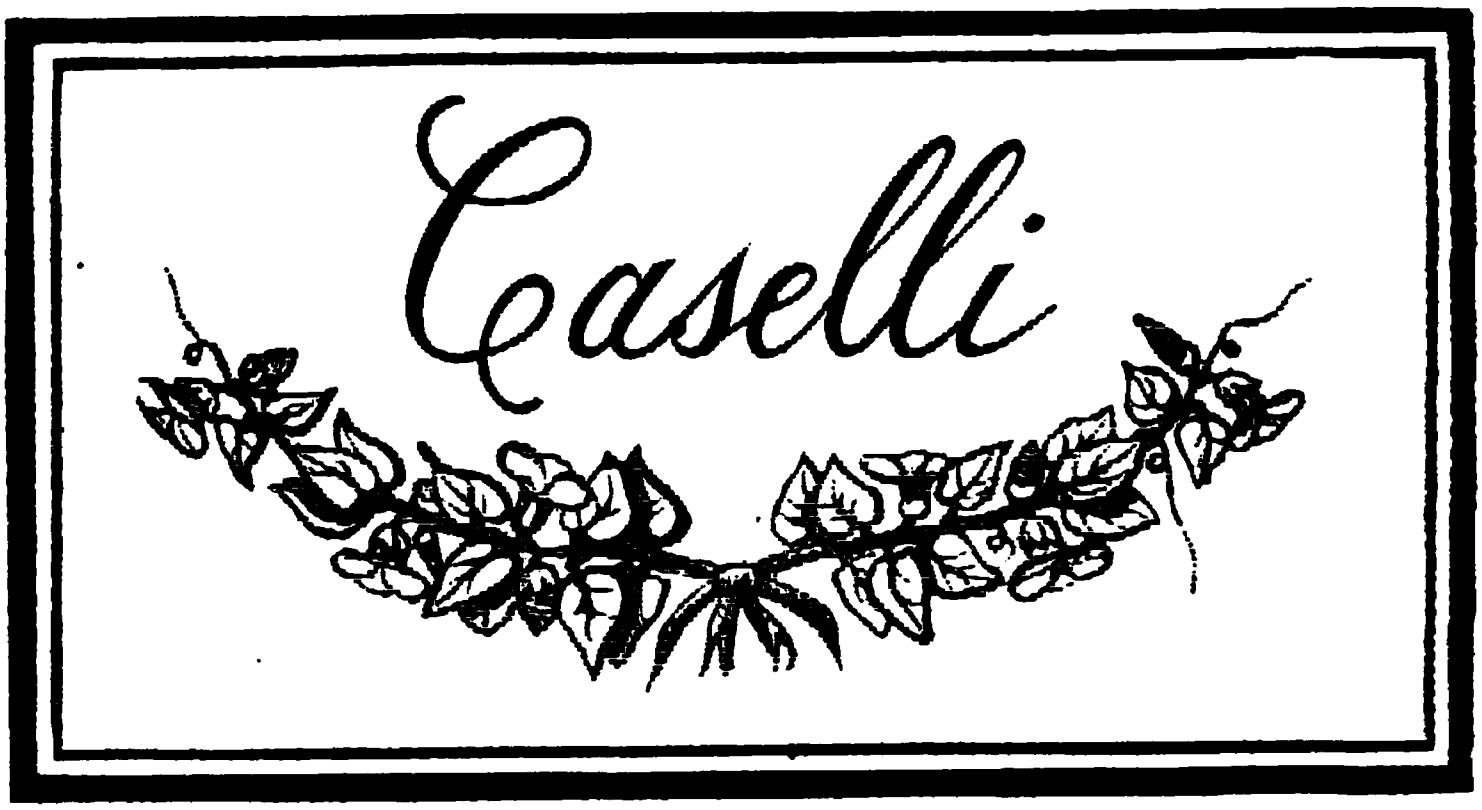


Fig. 462.

rectilignes (*), etc. La figure 461 est le spécimen de la dépêche, telle qu'elle est livrée par l'expéditeur; la figure 462 est la même dépêche, telle qu'elle est reproduite par l'appareil du poste d'arrivée.

596. **Sonneries.** — Les sonneries, placées dans les bureaux des postes télégraphiques, sont intercalées dans le circuit de la ligne de manière à entrer en jeu sous l'influence du courant envoyé par l'un des postes correspondants, qui demande à transmettre une dépêche. — Nous ne décrirons ici que la sonnerie à trembleur, la plus simple de toutes.

Le timbre T (*fig.* 463) est fixé à la partie supérieure d'une boîte de bois; dans la boîte est un électro-aimant en fer à cheval, et, en regard de ses surfaces polaires, une palette mobile, composée d'un cylindre de fer creux L, d'une lame d'acier très-élastique fixée inférieurement en C, et d'une tige armée d'un marteau M destiné à frapper sur le timbre T. A l'état de repos, la palette L, écartée des surfaces polaires, appuie contre le ressort *r* qui communique, par le bouton D et la borne E, avec le fil de terre.

Le courant de la ligne arrive dans le fil de l'électro-aimant; de là il passe, par le bouton C, dans la palette L, et, si celle-ci est au repos, il s'écoule dans le sol par le ressort *r*. Mais, le passage même du courant

(*) C'est par la reproduction d'un trait rectiligne, tracé parallèlement au bord de la feuille, comme l'un des traits verticaux de la figure 491, que l'on règle le synchronisme des deux appareils. — Il est clair que, si ce synchronisme n'était pas rigoureusement établi, l'appareil d'arrivée ne donnerait qu'une dépêche illisible.

ayant pour effet d'aimanter l'électro-aimant, la palette est attirée et s'éloigne du ressort *r* : le circuit est interrompu, et l'électro-aimant cesse d'attirer la palette. La lame élastique d'acier qui supporte la palette la

Fig. 463. — Sonnerie à trembleur.

ramène alors au contact du ressort *r* ; le circuit est de nouveau fermé ; la palette est attirée de nouveau par l'électro-aimant, et ainsi de suite, tant que dure le passage du courant : chacun des mouvements de la palette vers l'électro-aimant frappe un coup sur le timbre.

597. **Paratonnerres pour les appareils des stations télégraphiques.** — Dans les temps d'orage, les fils des lignes télégraphiques s'électrisent par influence : des courants d'intensité et de sens variables s'établissent sur la ligne, et quand le mouvement électrique devient considérable, il peut arriver que les appareils soient détériorés ou que la sûreté des employés soit gravement compromise.

Plusieurs moyens ont été proposés pour éviter ces accidents. Nous décrirons seulement un petit appareil construit par M. Breguet et connu sous le nom de *paratonnerre*.

Deux plaques métalliques, U, V (*fig.* 464), sont séparées par un intervalle très-petit, et armées de pointes sur leurs bords en regard. Le fil de la ligne aboutit à la plaque V ; cette même plaque porte un commutateur N, dont le ressort métallique peut à volonté être amené sur l'une des trois

pièces de cuivre, en forme de *gouttes de suif*, T, I, CD. Lorsque le commutateur est sur la goutte de suif I, comme le suppose la figure, le courant arrivant de la ligne passe de I en G, par une communication métallique qui est indiquée sur la figure par un trait ponctué ; puis de G en H, à travers un fil de fer très-fin, qui est contenu dans un tube de verre ; enfin, de H en F et aux appareils du poste : cette position du commutateur est donc la position de *réception*.

Si par un temps d'orage, il se développe subitement sur la ligne un courant électrique intense, le fil de fer, en raison de son petit diamètre, est fondu, et toute communication est interceptée entre la ligne et les appareils, avant que le flux d'électricité ait acquis assez de force pour les détériorer — Si la tension électrique sur le fil de la ligne est très-considérable, une décharge se fait par les pointes métalliques, de la plaque V à la plaque U qui communique avec la terre, et l'électricité accumulée se perd dans le sol (*).

Fig. 464. — Paratonnerre.

Quand on est menacé d'un violent orage, il est prudent de renoncer à la correspondance, qui, d'ailleurs, deviendrait bientôt impossible. On pousse alors le commutateur sur la goutte de suif T, qui est en communication permanente avec la plaque U : l'électricité accumulée sur la ligne passe par le commutateur sur la plaque U et se perd dans le sol.

598. **Télégraphie sous-marine.** — Le premier conducteur sous-marin qui ait été immergé, pour transmettre des dépêches télégraphiques d'une côte à une autre, fut un fil de cuivre, couvert d'une enveloppe de gutta-percha, et ayant une longueur de 45 kilomètres : il unissait la France à l'Angleterre; les deux extrémités aboutissaient l'une à Douvres, l'autre au cap Gris-Nez, entre Boulogne et Calais. Ce fil fut rapidement

(*) Les bureaux qui correspondent avec deux postes situés l'un à droite, l'autre à gauche, sont munis de deux paratonnerres fixés symétriquement sur le même support. Ces deux appareils sont mis en communication permanente par un fil métallique fixé en E. Quand on veut établir la correspondance directe entre les deux postes de droite et de gauche, sans que le courant de la ligne passe par les appareils du bureau, on pousse les commutateurs N des deux paratonnerres sur les gouttes de suif marquées CD ; par ce moyen, les deux fils de ligne qui pénètrent dans le bureau sont en *communication directe*.

détruit, puis remplacé, et après diverses améliorations introduites par l'expérience, soit dans la préparation des conducteurs, soit dans les procédés d'immersion, on est parvenu aujourd'hui à établir la correspondance télégraphique entre les côtes les plus éloignées, entre la côte de l'Irlande et celle de l'Amérique, au travers de l'océan Atlantique. — On a rencontré dans la transmission des signaux, par ces conducteurs environnés d'eau de mer, des difficultés nouvelles, qui ont exigé l'emploi d'instruments nouveaux : ce sont ces conditions particulières et les appareils qu'on a pu y adapter qu'il nous reste à faire connaître, au moins d'une manière générale.

599. **Câbles sous-marins.** — Un *câble sous-marin*, tel que ceux qu'on emploie aujourd'hui, contient dans son axe un conducteur métallique; c'est un fil de cuivre, ou plutôt un faisceau de sept fils de cuivre, C, exactement juxtaposés (*fig.* 465). La multiplicité des fils présente cet avantage que, s'il vient à se produire quelques ruptures, par les tiraillements auxquels le câble sera soumis, il y a des chances pour qu'elles ne portent pas au même endroit sur tous les fils : alors, malgré ces ruptures, le passage du courant dans la longueur du faisceau pourra encore s'effectuer. — Ce conducteur doit être isolé de l'eau de mer, qui est elle-même conductrice : on l'entoure de gutta-percha, ou de divers mélanges ayant des propriétés encore plus isolantes, et l'on a soin d'en mettre plusieurs couches, ainsi qu'on l'a indiqué ci-dessus en G, afin que les gerçures des unes puissent être fermées par les autres. Le conducteur C et son enveloppe isolante G constituent l'*âme* du câble : on conçoit avec quel soin minutieux elle doit être fabriquée, puisque la moindre imperfection en un point suffirait pour amener une déperdition rendant toute transmission impossible.

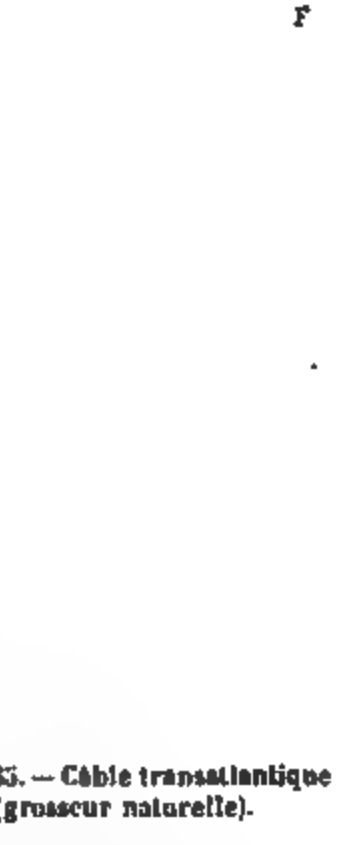


Fig 465. — Câble transatlantique (grosseur naturelle).

L'âme est ensuite entourée d'une *armature* : c'est une couche de fils de fer F, F, environnés chacun d'une enveloppe de chanvre, et tournés en spirale autour de l'âme. L'armature est destinée à soutenir et à protéger l'âme pendant la pose, à la défendre ensuite des frottements contre les

rochers, et enfin à donner de la résistance au câble s'il vient à être accroché par les ancres d'un navire (*).

600. Phénomènes de condensation dans les câbles sous-marins. — Expériences de M. Varley. — Dès les premiers essais de télégraphie sous-marine, on s'aperçut que les appareils ordinaires, placés aux extrémités du câble, fonctionnent avec une extrême lenteur : qu'un récepteur de Morse, par exemple, placé à la station d'arrivée, n'obéit que très-lentement aux alternatives d'établissement et de rupture du courant, produites à la station de départ, en sorte qu'il faudrait mettre de très-longs intervalles entre les signaux qui forment une dépêche, si l'on voulait faire usage des procédés ordinaires.

Cette difficulté ne pouvant provenir que de l'action du câble lui-même, les physiciens l'attribuèrent immédiatement à un phénomène de *condensation*. — Le faisceau de fils métalliques qui est dans l'axe du câble est un corps conducteur, qui reçoit le fluide fourni par la pile : il est environné d'un corps isolant, qui est la gutta-percha, et celle-ci est environnée à son tour par un corps conducteur d'une immense étendue, qui est l'eau de la mer elle-même. Ce sont là des conditions qui doivent donner lieu à une condensation dans le conducteur métallique, c'est-à-dire à une accumulation successive du fluide électrique dans les diverses parties de ce conducteur, à mesure que le fluide y arrive.

Une disposition extrêmement ingénieuse, imaginée en Angleterre, par M. Varley, permet en effet de se rendre compte, presque point par point, de la façon dont se comporte un pareil câble. M. Varley a eu l'idée de réaliser, dans son laboratoire, un conducteur qui offrit une résistance comparable à celle d'un câble allant d'Angleterre en Australie. Pour cela, il emploie une série de colonnes liquides, placées dans des tubes U réunis bout à bout par des fils conducteurs (*fig.* 466) ; chacune de ces colonnes liquides présente une énorme résistance. Entre les tubes consécutifs, il place des galvanomètres G, G..., dont chacun est supposé représenter un point déterminé du câble : Gibraltar, Malte, Suez, Aden, Bombay, Calcutta, Singapore, etc. Enfin il adjoint à cette ligne une série de condensateurs, représentés en C, C..., dans la figure ci-contre. — Les choses

(*) Les dangers que peut courir le câble, une fois qu'il est posé ne sont pas les mêmes pour toute la longueur. Dans les mers profondes et à une grande distance des côtes, il n'a plus à craindre d'être tiraillé par les ancres de navires : il est même complétement à l'abri des frottements produits par l'agitation des flots, car on sait maintenant que, pendant les plus grandes tempêtes, il règne toujours, à partir d'une profondeur de 25 à 30 mètres, un calme parfait, contrastant avec l'agitation de la surface. On réserve donc les armatures puissantes pour les deux extrémités voisines des côtes, pour les *bouts côtiers*. Pour toute la partie intermédiaire, on diminue le diamètre des fils de fer, de manière à ne pas charger inutilement le navire qui doit effectuer la pose. Avec une réduction aussi grande qu'on l'avait cru possible, le câble atlantique posé en 1866, le plus léger de tous, eu égard à son diamètre (ce diamètre est reproduit exactement dans la figure 465), pesait encore 865 kilogrammes par kilomètre, c'est-à-dire près de 4 millions de kilogrammes.

étant ainsi disposées, M. Varley a constaté immédiatement que cette sorte de ligne artificielle présente, quand on veut la faire fonctionner avec les

Fig. 466.

appareils télégraphiques ordinaires, toutes les difficultés des lignes sous-marines ; si l'on vient à supprimer les condensateurs, elle fonctionne comme une ligne aérienne.

Rien de plus facile maintenant que d'étudier directement l'allure du courant sur une pareille ligne : il suffit d'observer les galvanomètres, qui sont tous placés sous les yeux de l'expérimentateur. — Lorsque le courant est lancé sur la ligne, toutes les aiguilles aimantées commencent à se mouvoir, et cela dans un intervalle de temps à peu près inappréciable. Mais le courant accusé dans les stations les plus voisines de la pile, à Gibraltar, à Malte, est assez intense : celui qui arrive aux stations éloignées, à Calcutta, à Singapore, est d'abord très-faible. Ce n'est qu'au bout d'un temps appréciable qu'on voit l'intensité acquérir, de proche en proche, des valeurs comparables entre elles sur toute la ligne, et atteindre enfin à l'extrémité australienne une valeur assez considérable. Il est donc facile de comprendre qu'un appareil de Morse, placé à l'extrémité australienne, n'obéisse que lentement dans de pareilles conditions, puisque l'armure de son électro-aimant ne peut être attirée qu'au moment où le courant aura enfin acquis une intensité suffisante. — De même, quand on interrompt le courant au point de départ, il ne perd que graduellement son intensité au point d'arrivée, et l'on s'explique ainsi que l'électro-aimant n'abandonne son contact qu'au bout d'un temps appréciable. De là cette lenteur observée avec les récepteurs ordinaires, et la nécessité de trouver un autre récepteur.

601. **Récepteur de M. William Thomson, pour la télégraphie sous-marine.** — Le récepteur qui a été imaginé par M. William Thomson se compose d'un cadre sur lequel s'enroule un fil métallique couvert de soie PQ (*fig.* 467), dont les extrémités sont en A et B : au centre de ce cadre est placé, comme le montre la figure, un petit miroir circulaire, sur

lequel est appliqué, en arrière, un petit barreau aimanté (ce petit barreau ns est indiqué sur la figure par des traits ponctués). Le barreau et le fil pèsent ensemble environ 5 centigrammes, c'est-à-dire la centième partie du poids d'une pièce d'un franc; ils sont supportés par un fil de cocon de un millimètre de longueur, qui est indiqué par un trait vertical dans la figure ci-contre.

Avec une si petite masse, le barreau aimanté et le miroir qui le porte doivent se mettre en mouvement sous l'action des courants les plus faibles qui viennent à traverser le fil enroulé sur le cadre. Pour rendre les mouvements bien appréciables, on fait tomber sur le miroir les rayons lumineux émis par une lampe fixe : ces rayons sont renvoyés sur un écran placé à une certaine distance, et, pour peu que l'aiguille et le miroir soient déviés, cette image réfléchie se déplace sur l'écran, d'une quantité sensible. — Enfin, on peut produire à volonté la déviation d'un côté ou de l'autre : il suffit, pour cela, de mettre la ligne en communication tantôt avec le pôle positif, tantôt avec le pôle négatif de la pile. Ce récepteur peut donc donner deux espèces de signaux, se distinguant nettement l'un de l'autre ; ces signaux, groupés de diverses manières, suffisent pour désigner toutes les lettres de l'alphabet, de même que, dans le télégraphe de Morse, le point et le trait ont suffi pour arriver au même résultat.

Fig. 407. — Récepteur de M. Thomson.

602. **Superposition des courants successifs dans les câbles sous-marins. — Manipulation adoptée.** — Le récepteur de M. Thomson a l'avantage d'obéir aux courants les plus faibles, et, par suite, de se mettre en mouvement dès qu'arrive la plus petite onde, c'est-à-dire à peu près au moment même où le courant est lancé sur la ligne. Mais ce n'est là jusqu'ici qu'un avantage illusoire, car la ligne artificielle de M. Varley montre, comme il a été dit (600), qu'à l'instant où une petite impulsion se produit en Australie, le courant qui est en marche sur la ligne a une intensité considérable dans les points précédents; elle montre, en outre, que l'impulsion imprimée à l'aiguille australienne va ensuite en croissant toujours; elle montre, enfin, que si l'on veut envoyer de nouveaux courants, les uns positifs, les autres négatifs, avant que la ligne soit rentrée dans le repos, il y a bientôt superposition des effets produits par les flux et reflux de ces ondes alternativement de sens contraire, et confusion de tous les signaux, de sorte que l'aiguille aimantée, précisément à cause de sa légèreté, est comme affolée : ses mouvements n'ont plus aucun sens raisonnable.

M. Varley a pensé à profiter de cette superposition même des effets des courants, qui était nettement accusée par son appareil, pour ramener instantanément la ligne au repos. La manipulation employée par lui, dès 1853, est la suivante. — Supposons qu'on veuille envoyer un signal *positif :* on lancera d'abord dans la ligne un courant positif ; puis, à la suite, immédiatement et avant même que le signal ait eu le temps de se produire, un courant négatif. L'action du premier courant se produira avant celle du second ; mais l'aiguille aura à peine eu le temps d'en recevoir une petite impulsion, que, ces deux actions contraires se neutralisant, elle pourra revenir à sa position d'équilibre. Elle sera prête pour recevoir un nouveau signal, soit dans le même sens, soit en sens contraire.

Enfin, on ne s'en est pas tenu là ; après une série de tâtonnements, et des recherches patientes qui ont duré dix années, M. Varley a obtenu une action plus rapide encore sur le récepteur, une neutralisation plus complète de la ligne, en employant, au lieu de deux courants consécutifs, pour un même signal, jusqu'à cinq courants alternativement contraires. Pour un signal positif, par exemple, trois courants positifs d'inégale durée, séparés les uns des autres par deux courants négatifs, pénètrent dans la ligne avant qu'aucun mouvement se manifeste à la station d'arrivée : « il se produit alors sur la ligne tout entière, comme le dit M. Varley, une série de vagues alternativement positives et négatives, et le résultat au point d'arrivée est une petite vague positive, parfaitement distincte. » L'ordre de succession est inverse pour un signal négatif.

Grâce à ces divers perfectionnements, et à quelques autres que nous ne pouvons décrire ici, on a pu atteindre une vitesse de huit mots par minute : résultat qui paraît merveilleux, quand on songe qu'il s'agit de mots contenant en moyenne cinq lettres, que chaque lettre est indiquée par un, deux, trois ou quatre mouvements du miroir, ce qui fait une moyenne de 100 à 120 impulsions par minute. — On espère cependant, avec l'exercice, atteindre une rapidité plus grande encore.

CHAPITRE VII

COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES

---

603. **Courants thermo-électriques.** — On nomme *courants thermo-électriques* des courants qui prennent naissance dans des circuits fermés dont on maintient certains points à des températures différentes. La production de ces courants a été découverte, en 1821, par Seebeck, et étudiée depuis lors par divers physiciens, notamment par M. Becquerel et par M. Magnus.

Nous ne nous occuperons ici que des courants produits sous l'influence de la chaleur dans des circuits *entièrement métalliques*, et nous distinguerons deux cas : celui où le circuit est formé d'un seul métal, et celui où le circuit est constitué par une chaîne de métaux différents.

604. **Circuits formés d'un seul métal.** — Supposons que les deux extrémités d'un fil de platine *parfaitement homogène* aient été fixées aux deux bouts du fil d'un galvanomètre. Si l'on vient à chauffer un point de ce fil de platine, voisin de son milieu, on n'observe aucune déviation de l'aiguille, donc aucun courant électrique. Mais si, avant de faire cette expérience, on a préalablement fait subir à l'une des moitiés du fil un traitement capable d'en modifier l'état moléculaire, l'action de la chaleur appliquée dans le voisinage du point milieu développe un courant électrique, qui dévie l'aiguille du galvanomètre. — Pour produire cette modification moléculaire, on peut après avoir étiré le fil à la filière, recuire l'une des moitiés, c'est-à-dire la chauffer à une température assez élevée et la laisser ensuite refroidir lentement ; on peut encore prendre le fil tel que le commerce le fournit, et en marteler une partie ; on peut enfin écrouir une portion du fil, en la

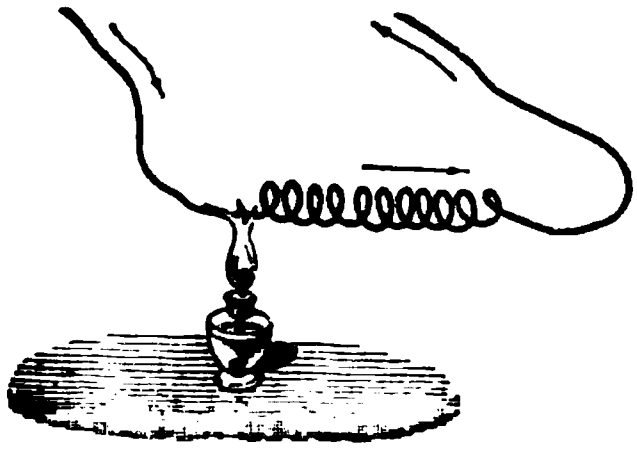


Fig. 468.

contournant sur elle-même de manière à en faire une hélice ou nœud, puis chauffer un point voisin de la spirale ou du nœud, comme le montre la figure 468.

Le courant obtenu dans ces diverses circonstances est dirigé, selon la nature du métal, tantôt de la partie la plus dure du fil vers la partie la moins dure, en passant par le point échauffé, tantôt en sens inverse. Le premier cas se présente pour le fer, l'étain, le zinc; le second, pour le laiton, l'argent, l'acier, le cuivre, l'or, le platine.

605. **Circuits composés de plusieurs métaux.** — Lorsqu'on forme un circuit avec deux barreaux ou deux fils métalliques, de natures différentes, soudés par leurs extrémités, il suffit, pour obtenir un courant thermo-électrique, de maintenir les deux soudures à des températures inégales. — C'est ce que l'on démontre au moyen d'un petit appareil dû à Seebeck. BB′ (*fig.* 469) est un prisme de bismuth, aux extrémi-

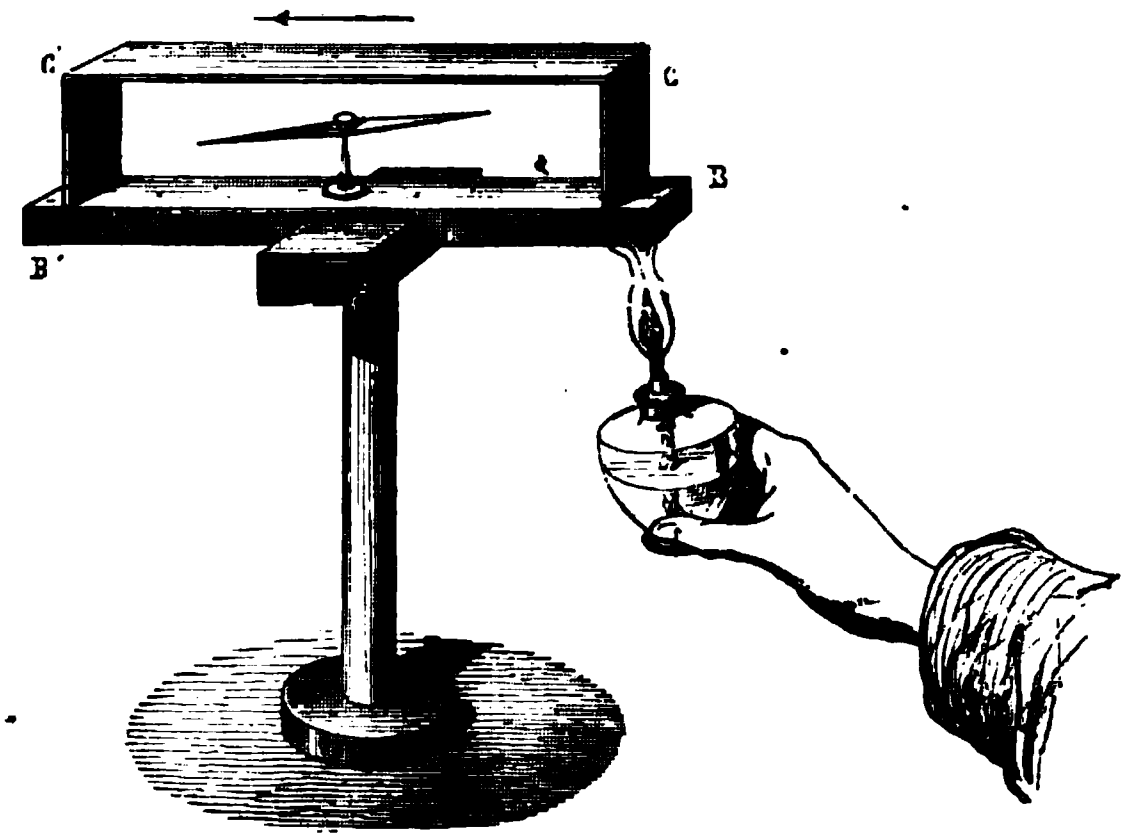


Fig. 469. — Expérience de Seebeck.

tés duquel est soudée une lame de cuivre recourbée CC′. On place dans l'intérieur du rectangle une aiguille aimantée et l'on oriente le plan du cadre BCC′B′ dans le méridien magnétique. Si l'on chauffe une des soudures B ou B′, avec la flamme d'une lampe à alcool, l'aiguille est déviée; le sens de cette déviation indique que le courant thermo-électrique traverse la soudure échauffée en allant du bismuth au cuivre.

Des courants semblables peuvent être obtenus avec deux métaux quelconques. — Ainsi, si l'on met un galvanomètre en communication avec les extrémités de deux fils métalliques, de natures différentes, dont les deux autres bouts soient soudés ou fortement appliqués l'un contre l'autre, il suffit de chauffer le point de jonction pour que l'aiguille du galvanomètre soit déviée. Le sens du courant dépend de la nature des mé-

taux employés. — Dans le tableau suivant, un métal quelconque est *positif* par rapport à ceux qui le suivent, et *négatif* par rapport à ceux qui le précèdent; en d'autres termes, deux métaux quelconques de la série étant accouplés comme il vient d'être dit, si l'on échauffe le point de jonction, il se produit un courant qui traverse ce point en passant du métal qui précède au métal qui suit :

Bismuth.	Argent.	Or.
Nickel.	Étain.	Zinc.
Platine.	Plomb.	Fer.
Palladium.	Rhodium.	Arsenic.
Cobalt.	Laiton.	Antimoine.
Manganèse.	Cuivre.	

606. **Couple thermo-électrique.** — Si, aux deux extrémités d'un cylindre de bismuth B, deux fois recourbé à angle droit, on soude deux gros fils de cuivre C, C' (*fig.* 470), on a un *couple thermo-électrique*. Il suffit, pour obtenir un courant, de fermer le circuit en réunissant les deux bouts des fils C, C', puis d'échauffer l'une quelconque des deux soudures; le courant est dirigé du bismuth au cuivre à travers la soudure chauffée.

Fig. 470.

Fig. 471. — Couple thermo-électrique.

Si les deux soudures du couple sont maintenues à des températures invariables, l'intensité du courant thermo-électrique demeure constante. —

Ce principe peut se démontrer, par exemple, en plongeant la soudure A dans un vase V (*fig.* 471) contenant de l'eau bouillante, et la soudure D dans un vase V′ contenant de la glace fondante; on fait ensuite communiquer les fils C et C′ avec un galvanomètre, et l'on observe que la déviation de l'aiguille reste constante aussi longtemps que les températures en A et en D demeurent invariables. — Si cette condition est remplie, le couple thermo-électrique est donc un véritable *couple à courant constant;* il est d'ailleurs le seul auquel cette dénomination soit applicable en toute rigueur.

607. **Les intensités des courants fournis par un couple thermo-électrique sont proportionnelles, entre certaines limites, aux différences de températures des deux soudures.** — Supposons qu'on ait deux couples thermo-électriques, parfaitement *identiques*, c'est-à-dire donnant des déviations égales à un même galvanomètre, quand leurs soudures correspondantes présentent la même différence de température : supposons, en outre, que l'on ait un galvanomètre sur lequel soient enroulés deux fils *identiques* F et F′, c'est-à-dire tels qu'en faisant traverser ces deux fils successivement par le courant d'une source constante, on obtienne des déviations rigoureusement égales. — Maintenons à zéro la soudure D du premier couple, et à 2 degrés par exemple la soudure A, puis mettons les deux fils C et C′ en communication avec le galvanomètre; soient 30° la déviation obtenue. Portons aux mêmes températures les soudures correspondantes du second couple, et mettons ce couple en rapport avec le fil F′. Avec ces deux courants égaux, agissant simultanément sur l'aiguille, on observera, par exemple, une déviation de 55°. Enlevons enfin le second couple, mais portons la soudure A du premier à 40 degrés, tandis que D reste maintenue à zéro : nous observerons encore une déviation de 55°. Donc un courant unique, dû à une différence de température de 40 degrés, produit une déviation égale à celle que donnent deux courants dus à une différence de 20 degrés, lorsqu'ils agissent simultanément sur l'aiguille; en d'autres termes, l'intensité du premier est double de l'intensité de l'un quelconque des deux derniers.

Cependant l'expérience montre que la proportionnalité entre l'intensité du courant et la différence de température des deux soudures cesse d'exister quand cette différence dépasse une certaine limite. En général, on peut admettre qu'elle se maintient tant que la différence de température est inférieure à 40 degrés. Pour certains métaux, la limite est plus reculée : pour le fer et le cuivre, par exemple, la proportionnalité se maintient jusqu'à 140 degrés. — Quand la différence des températures dépasse ces limites, l'intensité du courant augmente suivant une loi moins rapide, puis atteint un maximum à partir duquel elle décroît, devient nulle, et enfin le courant change de sens. Pour le circuit fer et cuivre, le courant devient nul lorsque la différence de température des deux soudures est

d'environ 300 degrés; dans un circuit zinc et argent, le maximum d'intensité a lieu pour une différence de 120 degrés, et le courant devient nul quand cette différence atteint 225 degrés.

608. **Application du couple thermo-électrique à la graduation du galvanomètre.** — La proposition qui précède conduit à une méthode fort simple de graduation du galvanomètre, laquelle est surtout applicable aux galvanomètres *à gros fil* (565).

L'une des soudures du couple étant maintenue à zéro, on portera successivement l'autre à 5, 10, 15... 35, 40 degrés, et l'on notera à chaque fois la déviation de l'aiguille. A ces différentes déviations, correspondent, en vertu de la loi précédente, des courants dont les intensités sont entre elles comme les nombres 5, 10, 15... 35, 40; on conçoit donc que, par une construction graphique analogue à celle qui a été décrite à propos de la graduation de l'hygromètre de de Saussure (354), on puisse déterminer les intensités relatives des courants qui amèneraient l'aiguille aux divers points du cercle divisé. — Ces expériences montrent que, tant que la déviation ne dépasse pas une certaine limite, de 20 à 30° environ, et variable d'ailleurs d'un galvanomètre à l'autre, les écarts de l'aiguille sont proportionnels aux intensités des courants qui les déterminent; au delà, ces écarts croissent suivant une loi moins rapide.

609. **Pile thermo-électrique.** — Si l'on réunit un certain nombre de cylindres de bismuth, tels que B, B (*fig.* 472), en soudant à leurs extrémités des lames de cuivre convenablement repliées C, C, C, on obtient

Fig. 472 — Pile thermo-électrique.

une *pile thermo-électrique*. Si l'on plonge toutes les soudures de rang impair 1, 3, etc., dans l'eau bouillante, et toutes les soudures de rang pair, 2, 4, etc., dans la glace fondante, si enfin on réunit les deux pôles par un fil conducteur, tous les couples déterminent dans le circuit des courants de même sens, dont les intensités s'ajoutent. Pour le constater,

il suffit d'introduire dans ce circuit un galvanomètre préalablement gradué, et de déterminer les déviations obtenues : 1° en faisant agir tous les couples à la fois, c'est-à-dire en portant toutes les soudures impaires à 100° et toutes les soudures paires à zéro ; 2° en faisant agir un seul couple, c'est-à-dire en portant une seule soudure impaire à 100°, et maintenant à zéro toutes les autres soudures. En faisant alors usage de la table de graduation du galvanomètre, on verra que, si la pile se compose, par exemple, de 10 éléments, l'intensité du premier courant est égale à 10 fois celle du second ; il en sera de même, quel que soit le nombre des éléments employés. Donc :

L'intensité du courant fourni par une pile thermo-électrique est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle au nombre des éléments qui le produisent.

Il serait facile de constater, en opérant d'une manière analogue, que, pour la pile comme pour le couple thermo-électrique :

L'intensité du courant est proportionnelle à la différence de température des deux systèmes de soudures, pourvu que cette différence ne dépasse pas une certaine limite.

Le caractère distinctif de ces piles est la petitesse de leur force électromotrice (536), en sorte que leur intensité éprouve une diminution notable dès qu'on introduit dans le circuit une résistance un peu considérable. Si, par exemple, on fait passer un courant thermo-électrique dans un galvanomètre à fil long et fin, on n'observe qu'une déviation à peine appréciable, à moins que ce courant ne soit fourni par une pile d'un très-grand nombre d'éléments ; de même, pour produire la décomposition de l'eau et des sels au moyen des courants thermo-électriques, il faut recourir à des piles composées de couples très-nombreux. — Ces résultats se conçoivent sans peine, d'après ce qui a été dit précédemment des intensités des courants en général.

610. **Pile de Melloni. — Thermo-multiplicateur.** — On doit à Melloni un appareil thermo-électrique, destiné spécialement à l'étude de la chaleur rayonnante, et qui repose sur les principes précédents.

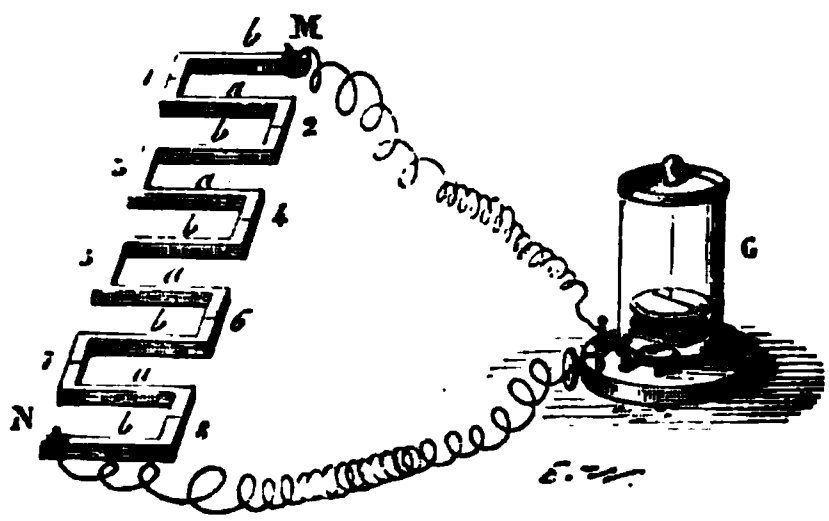


Fig. 473.

On forme une pile thermo-électrique, avec une série de petits barreaux de bismuth *a*, *a*... (*fig.* 473), recourbés comme l'indique la figure, et alternant avec des barreaux d'antimoine *b*, *b*...; les deux extrémités de la chaîne seront mises en communication avec le fil d'un galvanomètre G qui

fermera le circuit (*). Pour faciliter l'usage de cette pile, on replie la chaîne des petits barreaux, de manière à en former un faisceau prismatique CD (*fig.* 474), en ayant soin d'empêcher le contact des barreaux, partout ailleurs qu'aux soudures, par l'interposition de petites bandes de papier verni. Dans ce faisceau, toutes les soudures impaires sont ainsi

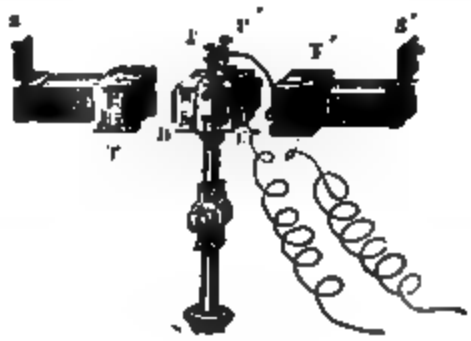


Fig 474. Fig. 475. — Pile thermo-électrique.

placées d'un même côté, toutes les soudures paires sont de l'autre : ces deux systèmes de soudure forment ce que nous nommerons les *faces* de la pile ; on les couvre d'une couche de noir de fumée, qui a un grand pouvoir absorbant pour la chaleur. Enfin, on assujettit la pile dans une gaine de cuivre, de manière que ses deux *faces*, placées verticalement, dépassent l'étui, de part et d'autre, en C et D (*fig.* 475) ; les deux extrémités de la chaîne sont mises en communication avec les boutons métalliques P, P', qui recevront les fils allant au galvanomètre. Deux tubes de cuivre T, T', munis d'opercules mobiles S, S', s'adaptent, de part et d'autre, et servent à préserver les faces de la pile, de la chaleur qui pourrait leur être envoyée par les corps environnants.

Les communications de la pile avec le galvanomètre étant établies, si l'on place en présence de l'une des faces, et à une certaine distance, un corps à une température un peu supérieure à celle de la pile, et qu'on lève l'opercule qui couvre cette face, il se produit un courant donnant naissance à une déviation immédiate du galvanomètre, déviation dont la grandeur dépend de la quantité de chaleur reçue. — Cet appareil, d'une extrême sensibilité, a reçu le nom de *thermo-multiplicateur* : nous verrons plus loin comment il peut fournir, dans les diverses circonstances, les mesures des quantités de chaleur qu'il reçoit.

611. **Aiguilles thermo-électriques de M. Becquerel.** — M. Becquerel a fait usage, dans ses recherches sur la température des êtres vivants, de deux aiguilles composées chacune d'un fil de fer F et d'un fil de cuivre C (*fig.* 476) soudés ensemble. Les extrémités *fer* des deux aiguilles sont réunies par un fil de fer, et les extrémités *cuivre* sont en communication avec le fil d'un galvanomètre. Lorsque la température de la

(*) Ce galvanomètre doit être *à gros fil*, d'après ce qui a été dit précédemment (563).

soudure de l'une des aiguilles est maintenue constante, le sens du courant qui traverse le galvanomètre indique le sens des petites variations de température éprouvées par l'autre soudure. Lorsque les deux soudures sont placées dans deux parties différentes du corps d'un même animal, le sens du courant indique de quel côté la température est le plus élevée.

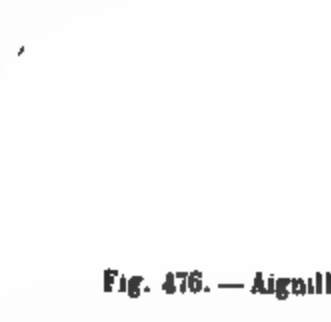


Fig. 476. — Aiguilles thermo-électriques.

M. Boutan a fait usage d'aiguilles thermo-électriques construites d'après le même principe, pour étudier la température des globules liquides caléfiés (334), et pour démontrer ainsi que cette température est toujours inférieure à celle de l'ébullition du liquide sous la pression de l'atmosphère.

CHAPITRE VIII

COURANTS D'INDUCTION

I. — PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX.

612. **Courants d'induction.** — On nomme *courants d'induction* des courants électriques qui prennent naissance sous l'influence d'autres courants, ou sous l'influence des aimants : la production de ces courants a été découverte par Faraday, en 1831.

En partant du principe que le magnétisme peut être développé dans le fer doux et dans l'acier sous l'influence des courants électriques, Faraday pensa que, réciproquement, les aimants pourraient faire naître des courants ; et puisque, dans les idées d'Ampère, les aimants sont assimilables à des systèmes de courants, les courants ordinaires devaient à leur tour jouir de la même propriété. L'expérience confirma ces conjectures.

Nous diviserons les courants d'induction en trois classes, savoir :

Courants volta-électriques, ou courants produits sous l'influence des courants voltaïques ordinaires ;

Courants magnéto-électriques, ou courants produits sous l'influence des aimants ;

Courants telluriques, ou courants produits sous l'influence de la terre.

613. **Courants volta-électriques.** — L'appareil suivant (*fig.* 477) peut servir à étudier les circonstances dans lesquelles des courants voltaïques ordinaires donnent naissance à des courants d'induction.

A et B sont deux *spirales cylindriques* ou *bobines :* chacune d'elles se compose d'un fil de cuivre couvert de soie, enroulé sur un cylindre creux, de bois ou de carton ; le sens de l'enroulement est le même sur les deux bobines. Les deux bouts du fil de la bobine B se terminent à des boutons auxquels on peut fixer les extrémités de fils métalliques qui se rendent à un galvanomètre G. Par une disposition semblable, les bouts du

fil de la bobine A peuvent être mis en communication avec les pôles d'une pile voltaïque V. — Interrompons, pour un instant, le courant de la pile, par exemple en détachant de la bobine A l'un des fils qui se rendent à la pile ; plaçons la bobine A dans la cavité de B, et, le galvanomètre étant réglé,

Fig. 477.

fermons de nouveau le circuit de la pile. A l'instant, l'aiguille est vivement chassée de sa position d'équilibre, mais elle y revient au bout de très-peu de temps, après avoir exécuté quelques oscillations de part et d'autre. — Cette expérience montre que, à l'instant où le courant de la pile, ou *courant inducteur*, s'établit dans le fil A, un autre courant, ou *courant induit*, se développe dans le fil B : le sens de la déviation de l'aiguille montre d'ailleurs que le courant induit est *de sens contraire au courant inducteur*.

Si, lorsque l'aiguille est revenue au zéro, on interrompt le courant de la pile, on observe une nouvelle déviation, en sens opposé de la première ; donc, au moment de la rupture, il se développe un courant induit *de même sens que le courant inducteur*.

En résumé :

1° *Un courant voltaïque, au moment où il* commence *à circuler dans un circuit fermé, développe, dans un circuit fermé voisin, un courant d'induction* inverse, *c'est-à-dire de sens contraire au courant inducteur.*

2° *Un courant voltaïque, au moment où il* est interrompu, *développe, dans un circuit fermé voisin, un courant d'induction* direct, *c'est-à-dire de même sens que le courant inducteur.*

614. L'appareil étant disposé comme l'indique la figure 477, et le courant de la pile traversant la spirale A, si l'on introduit brusquement cette spirale dans la cavité de B, l'aiguille du galvanomètre est déviée, et accuse un courant induit *inverse*. — Si, lorsqu'elle est revenue au zéro, on éloigne rapidement la spirale B, on constate un courant induit *direct*. — Donc :

1° *Un courant voltaïque, au moment où on* l'approche *d'un circuit fermé, développe un courant induit* inverse ;

2° *Un courant voltaïque, au moment où on* l'éloigne *d'un circuit fermé, développe un courant induit* direct.

615. — La spirale A, traversée par le courant de la pile, étant placée dans la cavité de B, et l'aiguille du galvanomètre étant au zéro, si l'on augmente, par un moyen quelconque, l'intensité du courant inducteur, par exemple en ajoutant un peu d'acide sulfurique au liquide dans lequel plonge le zinc de la pile, on observe une déviation qui accuse un courant induit *inverse;* on a, au contraire, un courant *direct*, si l'on diminue l'intensité du courant inducteur, par exemple en affaiblissant le liquide qui baigne le zinc. Donc :

1° *Un courant voltaïque, dont l'intensité* augmente, *développe dans un circuit fermé voisin un courant induit* inverse ;

2° *Un courant voltaïque, dont l'intensité* diminue, *développe un courant induit* direct.

616. **Courants magnéto-électriques.** — Soit B (*fig.* 478) une spi-

Fig. 478.

rale cylindrique, dont le circuit est complété par le fil du galvanomètre G. Dans l'intérieur de cette spirale, on place un barreau de fer doux N, et

l'on approche vivement de son extrémité supérieure l'un des pôles d'un aimant M. Le barreau N s'aimantant par influence, l'aiguille du galvanomètre reçoit une vive impulsion : elle oscille un certain nombre de fois, puis revient se fixer au zéro, où elle demeure aussi longtemps que l'aimant M reste immobile. On constate que le sens du courant induit est *inverse* de celui des courants particulaires (578) que l'aimantation a développés dans le barreau de fer doux N. — Si l'on retire rapidement M, le magnétisme du fer doux disparaît, et l'aiguille accuse un courant induit *direct*, c'est-à-dire de même sens que les courants particulaires qui existaient dans le fer doux.

De même, si, après avoir enlevé de la bobine le barreau N, on y introduit brusquement l'aimant, on obtient un courant *inverse*; si l'on retire l'aimant, on a un courant *direct*.

De ces faits, on peut déduire les conclusions suivantes :

1° *Si l'on fait* naître *l'aimantation dans un corps magnétique placé au milieu d'un circuit fermé, ou si l'on* introduit *un aimant dans ce circuit, on développe un courant d'induction dont le sens est* inverse *de celui des courants particulaires de l'aimant.*

2° *Si l'aimant inducteur* perd *son magnétisme, ou si l'on* éloigne *cet aimant, on développe un courant d'induction* direct.

617. **Emploi du fer doux comme moyen d'augmenter l'intensité de l'induction volta-électrique.** — Dans l'expérience que nous avons décrite au commencement du paragraphe précédent, le barreau de fer doux a développé, dans la spirale, un courant induit de même sens que celui qu'on aurait obtenu en faisant passer, dans une spirale placée à l'intérieur de la première, un courant voltaïque dirigé comme les courants particulaires de l'aimant. Dès lors, supposons que, dans la spirale B dont le fil communique avec le galvanomètre, on place une

Fig. 479.

spirale A enroulée de la même manière (*fig.* 479), et, à l'intérieur de celle-ci, un barreau de fer doux D; à l'instant où l'on établit la communi-

cation entre la spirale A et le couple voltaïque V, il se produit dans le fil B un courant d'induction inverse (613); en même temps, le fer doux s'aimante comme un électro-aimant ordinaire, et l'on voit que ses courants particulaires sont de même sens que ceux de la spirale A; ce magnétisme naissant développe de son côté, dans le fil B, un courant d'induction dont le sens est inverse de celui des courants particulaires : donc, dans le fil B, le courant induit volta-électrique et le courant magnéto-électrique sont de même sens, et, comme ils se produisent au même instant, leurs intensités s'ajoutent.

L'expérience montre qu'un *faisceau de fils* de fer, substitué au barreau D, renforce le courant induit plus énergiquement encore que ne fait le barreau unique.

618. **Courants telluriques.** — L'action de la terre est assimilable, dans l'étude des phénomènes électriques et magnétiques, à celle d'un aimant orienté du nord au sud, ou à celle d'un courant dirigé de l'est à l'ouest (574); il est donc à présumer que, si l'on place un circuit fermé dans diverses positions successives, la terre développera, à chacun des changements de position, un courant d'induction dans ce circuit.

Soit MN (*fig.* 480) une spirale cylindrique communiquant avec un galvanomètre très-sensible G; l'expérience montre que tout changement de position de cette spirale par rapport à la terre y développe un courant d'induction, accusé par une déviation de l'aiguille. — La direction de ce courant pourra être prévue de la manière suivante : Si l'on imagine, suivant l'axe de la spirale, une tige de fer doux, on sait que cette tige acquerrait, sous l'influence de la terre, une aimantation variable avec sa position : l'intensité du magnétisme serait la plus grande possible si la tige était parallèle à l'aiguille d'inclinaison (507); elle serait nulle si la tige était perpendiculaire à cette direction; dès lors :

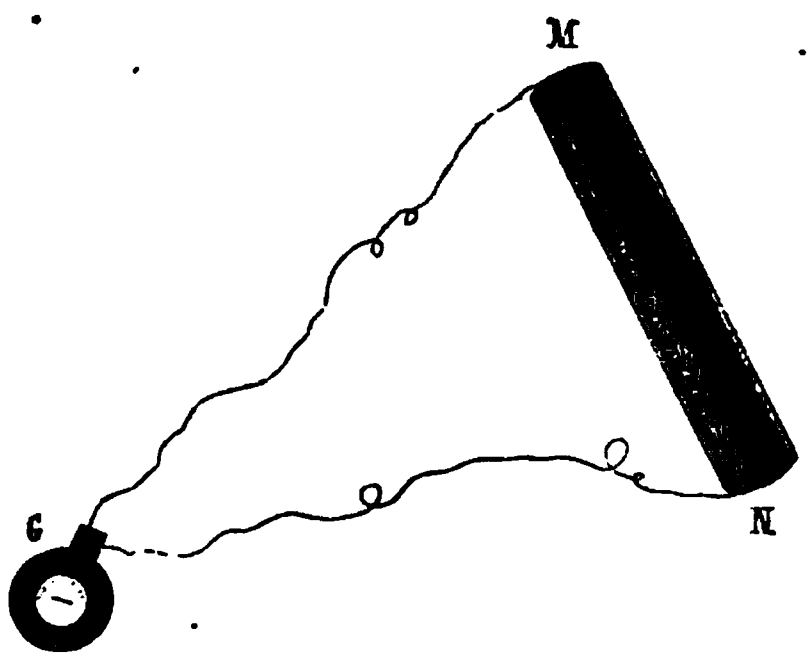


Fig. 480.

1° Tout changement de position qui tend à *augmenter* le magnétisme que prendrait la tige sous l'influence de la terre, développe un courant induit *inverse*, c'est-à-dire de sens contraire aux courants particulaires de la tige.

2° Tout changement de position qui tend à *diminuer* le magnétisme de la tige, développe un courant *direct*.

Il est facile de voir que le courant d'induction sera le plus intense pos-

sible lorsque, l'axe de la spirale étant d'abord parallèle à l'aiguille d'inclinaison, on l'amènera, par un mouvement rapide, à être perpendiculaire à cette même direction, ou réciproquement.

On prévoit aussi que, si l'on place réellement un barreau de fer doux dans l'intérieur de la spirale, la présence de ce barreau augmentera l'intensité des courants produits.

619. **Caractères généraux des courants induits.** — Tous les courants d'induction présentent le double caractère, de durer très-peu, et d'avoir une intensité considérable, même dans des circuits très-résistants.

Leur peu de durée est manifeste, d'après tous les faits qui précèdent : dans toutes les expériences que nous avons décrites, chaque fois qu'un courant induit traverse un galvanomètre, l'aiguille est vivement déviée ; elle exécute ensuite un certain nombre d'oscillations, *de part et d'autre du zéro*, et revient d'elle-même en ce point. L'action exercée sur l'aiguille par le courant d'induction est donc à peu près instantanée.

La grandeur de l'intensité que conservent les courants induits dans les circuits très-résistants peut être constatée en attachant aux deux boutons de la spirale induite B, dans l'une quelconque de ces expériences, au lieu des fils d'un galvanomètre, deux fils terminés par des poignées métalliques, telles que M et M′ (*fig.* 486) ; si l'on saisit ces poignées avec les mains humides, on éprouve, chaque fois qu'il se développe un courant induit, une commotion violente, comparable à celle que donnerait une pile d'un grand nombre d'éléments. — Nous reviendrons sur ce sujet après avoir décrit quelques-unes des machines d'induction.

620. **Induction d'un courant sur lui-même. — Extra-courants.** — Lorsqu'un courant parcourt un circuit, et qu'on vient à rompre et à rétablir successivement ce circuit, nous avons constaté qu'il se produit, à chacune de ses alternatives, un courant d'induction dans tout circuit fermé voisin du premier. — Il est naturel de penser que chacun des éléments d'un courant doit exercer une action inductrice semblable sur les éléments voisins qui font partie de son propre circuit : on prévoit *a priori* que cette action, si elle existe, sera surtout sensible si une partie du fil qui forme le circuit est enroulé plusieurs fois sur lui-même, de manière que chacun de ses éléments ait dans son voisinage un grand nombre d'autres éléments. C'est en effet la disposition adoptée dans les deux expériences de Faraday qu'il nous reste à décrire et qui prouvent l'induction exercée par un courant sur lui-même, soit au moment où on l'interrompt, soit au moment où on le rétablit. Ces courants d'induction, dont nous allons constater l'existence, ont reçu le nom d'*extra-courants*.

1° On fait passer le courant d'une pile PN (*fig.* 481) dans un long fil métallique, que l'on enroule en une spirale C dans une grande partie de sa longueur : on réunit deux de ses points D, E, situés de part et d'autre de la spirale, par un fil intermédiaire dans le trajet duquel est intercalé un

galvanomètre G ; le courant de la pile se partage ainsi entre deux circuits, l'un ADCEB, l'autre ADGEB, qu'il parcourt dans le sens des flèches indiquées sur la figure ; et si *mn* est la direction du diamètre passant par le zéro de la graduation, on voit le pôle austral de l'aiguille supérieure venir,

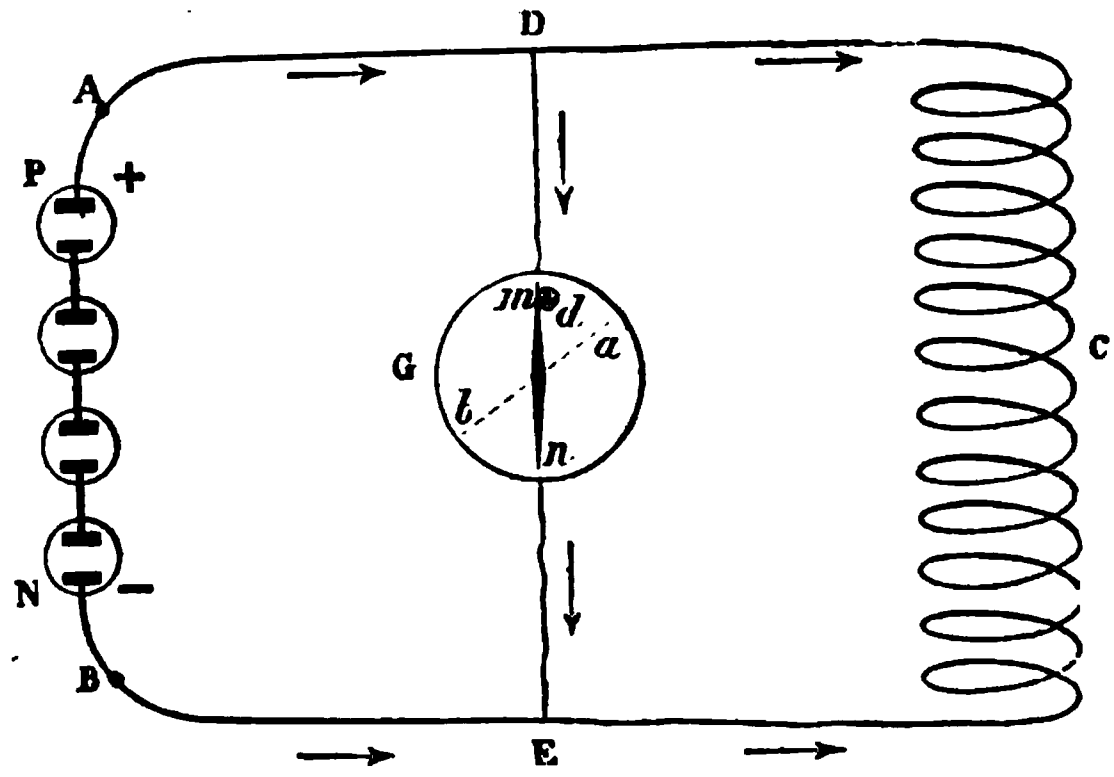


Fig. 481.

sous l'action du courant, à droite de *mn* par exemple, en *a*. On ramène alors, avec la main, l'aiguille dans la direction *mn*, et on place sur le cadran un petit obstacle *d* à la droite du point *m*, de manière à empêcher l'aiguille de s'écarter de ce côté. — Les choses étant ainsi disposées, si l'on interrompt le courant au voisinage de la pile, en A par exemple, le pôle austral reçoit une vive impulsion à gauche, après laquelle l'aiguille revient au zéro. Donc, au moment de la rupture du courant de la pile, le circuit fermé DGEC a été parcouru par un courant, et ce courant avait, dans la portion DGE, un sens contraire à celui du courant de la pile ; par suite, il avait, dans la spirale C, le *même sens que le courant de la pile*. — C'est là, comme on l'a vu (613), le caractère général d'un courant induit dû à l'interruption d'un courant inducteur : c'est l'*extra-courant de rupture*.

2° On détermine, par une expérience préliminaire la position *ab* (*fig.* 482) que prend l'aiguille du galvanomètre sous l'action du courant de la pile, et l'on place sur le cadran un petit obstacle *f* à la gauche du point *a*, de manière à empêcher l'aiguille de revenir au zéro quand on interrompt le courant en A. — Les choses étant ainsi disposées et le circuit de la pile étant ouvert au point A, on constate que, à l'instant où l'on referme le circuit en A, le pôle austral de l'aiguille reçoit une vive impulsion à droite, après laquelle elle revient en *a*. Donc au moment de la fermeture du circuit, le fil DGE n'a pas été seulement parcouru par une portion du courant de la pile, ayant une intensité telle qu'elle amenât l'aiguille en *ab* ; mais à ce

courant s'en est ajouté un autre, d'une durée très-courte, ayant le même sens dans la partie DGE, et ayant par conséquent, dans la spirale C, *un*

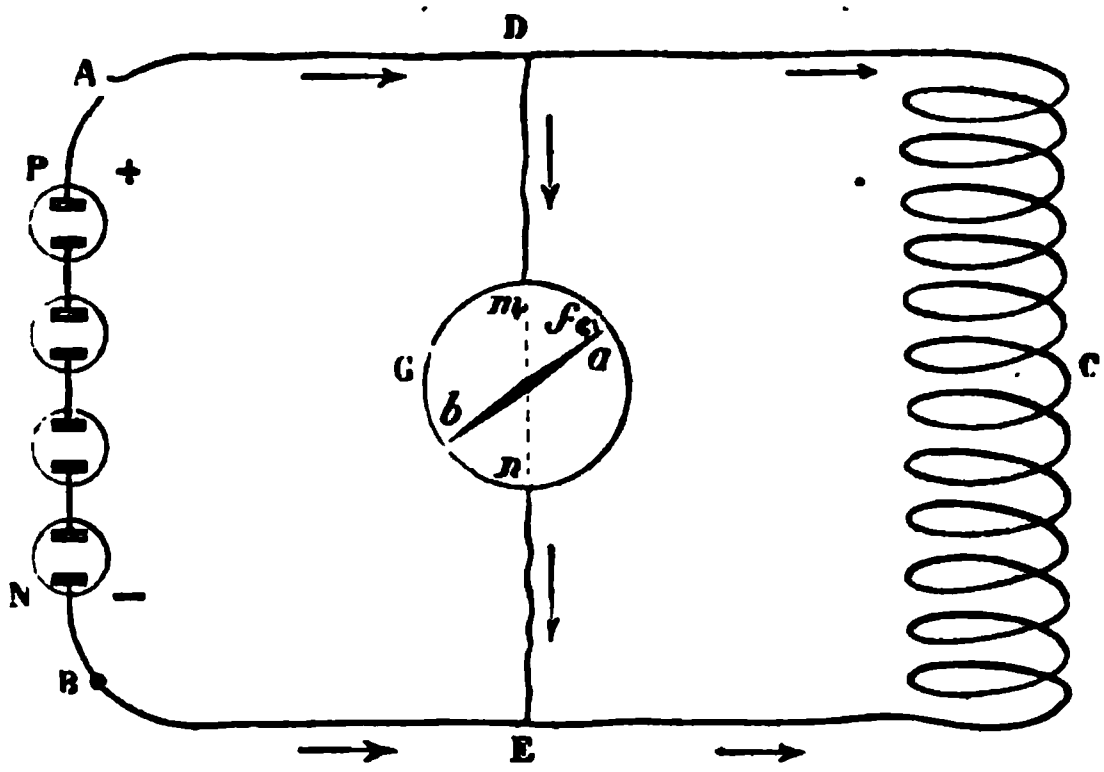


Fig. 482.

sens contraire à celui du courant de la pile. — C'est le caractère général d'un courant induit dû à la fermeture du courant inducteur : c'est l'*extra-courant de fermeture.*

621. **Conséquences de la superposition des extra-courants et du courant principal.** — L'extra-courant de fermeture, qui se produit au moment où l'on complète le circuit d'une pile, est, comme on vient de le voir, de sens contraire au courant principal. En se superposant à ce courant, il a donc pour effet d'en diminuer l'intensité, dans les premiers instants : par suite, le courant de la pile n'acquiert que graduellement son régime régulier.

Au contraire, l'extra-courant de rupture est de même sens que le courant principal; en se superposant à ce courant, il doit donc en augmenter subitement l'intensité. — C'est ce que confirment un grand nombre d'expériences : il suffira d'en indiquer quelques-unes.

La rupture du circuit d'une pile formée d'une dizaine d'éléments de Bunsen, lorsque le conducteur interpolaire est à peu près rectiligne, ne donne naissance qu'à une faible étincelle. Au contraire, si l'on interpose dans le circuit une bobine portant un fil enroulé un grand nombre de fois, l'étincelle de rupture devient très-forte, et éclate avec un bruit comparable à celui d'une capsule fulminante; or, l'introduction de la bobine ayant pour effet de diminuer l'intensité du courant de la pile, l'effet produit ici ne peut être attribué qu'à la superposition d'un extra-courant très-intense, au moment de la rupture.

Lorsque le circuit d'une pile contient une bobine, comme dans l'expérience précédente, et que, saisissant avec les deux mains les deux extré-

mités du fil de cette bobine, on les détache vivement de la pile, de manière que la spirale forme alors avec le corps de l'opérateur un circuit fermé, on ressent une commotion violente. L'intensité de cette commotion est beaucoup augmentée si l'on introduit dans la spirale un faisceau de fils de fer doux. — On reconnaît immédiatement, dans ces effets, ceux que nous avons indiqués comme caractérisant les courants induits en général.

622. **Courants induits d'ordres supérieurs.** — Pour compléter l'analogie des courants d'induction et des courants ordinaires, il reste à établir que les courants d'induction peuvent, à leur tour, exercer une action inductrice sur les conducteurs voisins. — C'est à quoi l'on parvient à l'aide de plusieurs couples de spirales telles que A et B (*fig.* 477). Supposons qu'on remplace le galvanomètre G par un couple de spirales A′ et B′; faisons communiquer les extrémités de B avec celles de A′, et adaptons aux boutons de B′ les poignées M et M′ de la figure 486. Si l'on saisit ces poignées dans les mains humides, on éprouve une commotion à l'instant où l'on ferme le circuit de la pile : on en ressent une seconde lorsqu'on interrompt ce circuit.

Il est facile d'expliquer le résultat de cette expérience : le courant de la pile, au moment où il s'est établi, a développé dans la spirale B un *courant induit du premier ordre;* celui-ci, traversant aussi la spirale A′, a joué, par rapport à B′, le rôle de courant inducteur, et a développé dans la spirale B′, dont le circuit est complété par le corps de l'opérateur, des *courants induits du deuxième ordre*. — Un courant du deuxième ordre peut de même induire, dans un troisième couple de bobines A″ et B″, des *courants induits du troisième ordre*, et ainsi de suite.

II. — MACHINES D'INDUCTION. — EFFETS DES COURANTS INDUITS.

623. **Machine magnéto-électrique de Clarke.** — Dans la machine de Clarke (*fig.* 483), les courants d'induction sont produits par les changements de position successifs d'une double bobine H, mobile au-devant d'un fort aimant fixe B. — Cet aimant se compose de plusieurs fers à cheval, fixés ensemble à une planche verticale P; l'axe métallique horizontal A, qui porte la double bobine, traverse la planche P et peut recevoir un mouvement de rotation par l'intermédiaire d'une chaîne sans fin et d'une roue R, qu'on fait tourner au moyen d'une manivelle. — La figure 484 représente, détachées de l'appareil, les deux bobines H et H′, et les pièces qui en dépendent. Chacune de ces bobines est formée d'un noyau de fer doux, autour duquel s'enroule un fil de cuivre entouré de soie.

Les extrémités antérieures des deux noyaux sont reliées par une plaque de fer doux *ff* (*fig.* 484), qui porte une série de pièces dont l'ensemble

constitue le *commutateur* de la machine. — L'axe du commutateur est formé par une tige métallique, indiquée sur la figure en lignes ponctuées.

Fig. 485. — Machine de Clarke.

Cet axe est enveloppé, dans toute sa partie antérieure, par une gaine d'ivoire qui porte deux demi-viroles métalliques g, g', isolées l'une de l'autre par deux fentes longitudinales. La demi-virole g' est en communication métallique avec l'axe, par l'intermédiaire de l'une des vis qui servent à la fixer; la demi-virole g, au contraire, est isolée de l'axe, mais elle communique avec un anneau métallique t; placé plus près des bobines. Les extrémités postérieures des deux fils, tordues en cordes et isolées, traversent la pièce ff et vont se souder à la virole t; elles communiquent ainsi avec la demi-virole g. Les extrémités antérieures viennent se souder à l'axe métallique, qui communique lui-même avec la demi-virole g'.

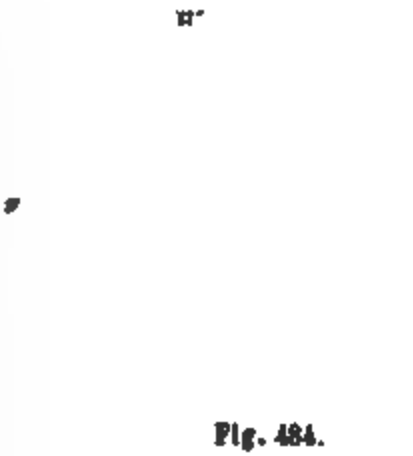


Fig. 484.

Au-dessous du commutateur, est un parallélipipède de bois S (*fig.* 483), dont les faces latérales sont garnies de bandes métalliques. Ces bandes reçoivent deux ressorts d'acier x, y, dont l'un vient presser contre la demi-virole g et l'autre contre la demi-virole g'. On y fixe également, en avant, les conducteurs dans lesquels on veut faire passer les courants induits. — Il nous reste à examiner comment circulent ces divers courants.

624. **Théorie de la production des courants dans la machine de Clarke.** — Supposons que les deux bandes métalliques qui portent les ressorts x et y (*fig.* 483) soient réunies par un conducteur, et que le système des bobines soit mis en mouvement.

Cherchons d'abord à nous rendre compte des phénomènes d'induction qui doivent se produire dans l'une des bobines, H par exemple (*fig.* 485), tandis qu'elle passe successivement par les positions 1, 2, 3, 4, en se déplaçant devant l'aimant B, dans le sens de la flèche f. — Lorsque la bobine est dans la position 1, en face du pôle austral a de l'aimant fixe, son noyau de fer doux acquiert un pôle boréal du côté de l'aimant fixe, et un pôle austral en avant du plan de la figure; les courants particulaires du fer doux sont donc alors dirigés comme l'indique la flèche f', en sens contraire du mouvement des aiguilles d'une montre (581). Si la bobine s'éloigne de la position 1, pour se rapprocher de la position 2, le magnétisme du noyau *diminue:* il se produit donc dans la spirale un courant magnéto-électrique *direct* (616), c'est-à-dire dirigé comme les courants particulaires, en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre. — Parvenu à la position 2, le noyau, également éloigné des deux pôles a et b qui exercent sur lui des influences contraires, a perdu son magnétisme; mais, dès qu'il a dépassé cette position, il s'aimante en sens contraire et prend un pôle boréal en avant du plan de la figure : les courants particulaires sont dirigés alors comme la flèche f'', dans le sens des mouvements des aiguilles d'une montre. Or, à mesure que la bobine s'éloigne de la position 2 pour s'approcher de la position 3, chaque déplacement détermine une *augmentation* de magnétisme ; à chaque déplacement, il se

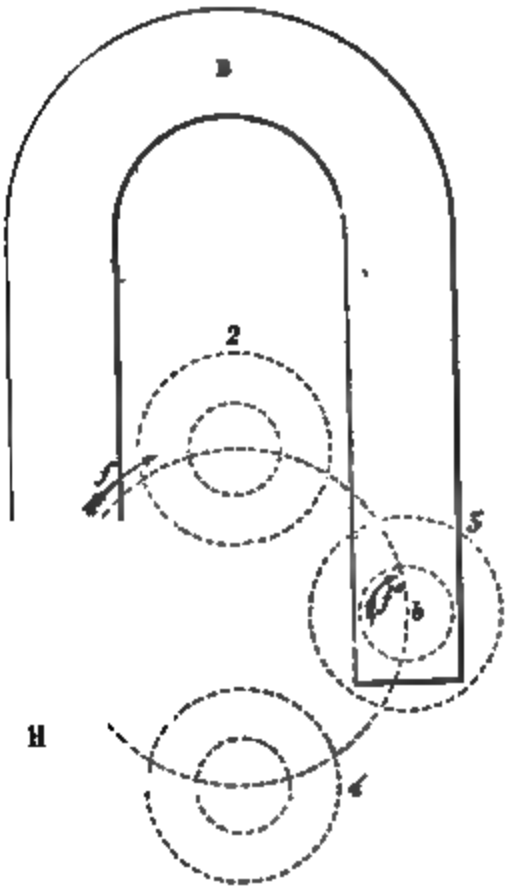


Fig. 485.

produit donc un courant induit *inverse*, c'est-à-dire, comme les courants induits précédemment obtenus, en sens contraire du mouvement des aiguilles d'une montre. — Donc, pendant que la bobine parcourt la moitié supérieure 1, 2, 3 de sa révolution, elle est constamment traversée par des courants induits, et ces courants sont tous de même sens. Un raisonnement semblable montrerait que, pendant la demi-révolution inférieure 3, 4, 1, les courants induits ont encore un sens constant, mais contraire à celui des premiers.

Supposons donc, pour fixer les idées, que l'enroulement du fil de la bobine H soit tel, que les courants produits pendant la demi-révolution supérieure marchent de l'extrémité antérieure de ce fil à son extrémité postérieure : ces courants circuleront, dans le conducteur qui fermera le circuit, de la demi-virole g' (*fig.* 484) à la demi-virole g. Au contraire, les courants développés pendant la demi-révolution inférieure, seront dirigés, dans ce même conducteur, de g vers g'. Et si l'on remarque que la bobine H′ fait la moitié inférieure de sa révolution pendant que H fait la moitié supérieure, comme les fils de ces deux bobines sont *enroulés en sens contraire* sur leurs noyaux, les courants de H′ seront dirigés de g' vers g en même temps que ceux de H, et changeront de sens avec eux. — Enfin, remarquons que, à chaque demi-révolution, chacun des ressorts x et y (*fig.* 483) passe de l'une des demi-viroles à l'autre, et cela précisément à l'instant où les courants induits changent eux-mêmes de sens : il en résulte que l'une des bandes métalliques de la pièce S correspond toujours au point de départ des courants, et l'autre à son point d'arrivée. Donc, si l'on réunit ces bandes par un arc conducteur, cet arc sera traversé par une succession de courants induits, dirigés *tous dans le même sens*. — Si, par exemple, on interpose un voltamètre V (*fig.* 483) dans le circuit, on constate que l'eau est décomposée : l'une des cloches contient uniquement de l'hydrogène, et l'autre cloche uniquement de l'oxygène.

625. **Disposition particulière de la machine de Clarke pour la production des effets physiologiques.** — Lorsqu'on veut employer la machine de Clarke à produire des commotions par le passage des courants au travers des organes, il importe surtout d'obtenir des interruptions brusques du courant, au moment où se trouvent réalisées les conditions qui lui donnent la plus grande intensité, afin que l'extra-courant de rupture, s'ajoutant alors au courant principal (621), produise ces variations rapides d'intensités qui sont nécessaires à la production des effets physiologiques. — Or, si le mouvement de rotation de l'axe qui porte les bobines est régulier, la théorie montre que chaque noyau éprouve les plus grandes variations dans son intensité magnétique, pour un même intervalle de temps, lorsqu'il est au voisinage de la position 2 ou de la position 4 (*fig.* 485), c'est-à-dire lorsque le plan passant par les axes des deux noyaux est perpendiculaire à la ligne des pôles de l'aimant fixe :

c'est donc dans ces positions des bobines que le circuit doit être interrompu.

On adapte à la pièce S des poignées de laiton M, M' (*fig.* 486), que l'on saisira avec les mains humides. Sur la bande métallique qui porte déjà le ressort x, on fixe un troisième ressort z, qui viendra toucher,

Fig. 486.

pendant la rotation, tantôt le prolongement métallique a (*fig.* 484) de la demi-virole g', tantôt un prolongement de g, qui est semblable et symétriquement placé. — Tant que ce ressort z porte sur l'ivoire, tout se passe comme s'il n'existait pas, et les courants traversent le corps de la personne qui tient les poignées; mais, au moment où z touche le prolongement de l'une des demi-viroles, la disposition est telle, que le ressort x, placé du même côté, touche l'autre demi-virole; le circuit se trouve donc fermé par les ressorts x, z et par la bande métallique qui les supporte, le courant cesse alors brusquement de traverser le corps de la personne soumise à l'expérience. Les prolongements a et a' sont placés de manière que cette interruption ait lieu précisément dans les positions 2 et 4 des bobines, c'est-à-dire deux fois dans la durée de chaque révolution.

626. **Production de quelques autres effets physiques.** — Pour produire les *effets calorifiques ou lumineux* on remplace les bobines à fil long et fin, par d'autres bobines à fil gros et court.

Si l'on veut obtenir des étincelles, on fixe sur l'axe du commutateur une aiguille a (*fig.* 487); sur la pièce S, on place un seul ressort x et une capsule métallique c pleine de mercure. Lorsque l'aiguille plonge dans le mercure, le circuit est fermé; mais, au moment où l'aiguille sort du liquide, une étincelle, due surtout à l'extra-courant de rupture, éclate entre le mercure et l'aiguille. — Si l'on verse une couche d'alcool ou d'éther à la surface du mercure, l'étincelle enflamme le liquide combustible.

La figure 488 montre la disposition adoptée pour faire rougir un fil métallique.

Fig. 487.

Fig. 488.

627. **Machine magnéto-électrique de Pixii.** — Les détails dans lesquels nous sommes entrés à propos de l'appareil de Clarke nous permettront de nous borner à des indications sommaires sur la construction

Fig. 489. — Machine magnéto-électrique de Pixii.

et la théorie de la machine magnéto-électrique de Pixii, la première des machines de ce genre qui ait été employée.

Elle est représentée d'ensemble par la figure 489, et se compose,

comme la machine de Clarke, d'une double bobine B, d'un aimant d'acier A, et d'un commutateur qu'on voit entre l'aimant et la planche de bois LL. Mais ici c'est la bobine qui est fixe, et c'est l'aimant qui tourne. l'axe de rotation est vertical, et reçoit son mouvement d'un engrenage à manivelle M.

628. **Machine d'induction de M. Ruhmkorff.** — La machine d'induction construite par M. Ruhmkorff est remarquable par l'intensité des effets de diverses natures auxquels elle peut donner naissance. Les courants induits qu'elle produit sont des courants volta-électriques (613) renforcés par l'action d'un faisceau de fils de fer doux placés à l'intérieur de la spirale inductrice (617).

La figure 490 représente l'ensemble de l'appareil ; la figure 491 en est le plan. — Sur un cylindre de bois qui contient le faisceau de fils de fer, s'enroule d'abord le fil inducteur, puis, par-dessus, le fil induit ; le tout

Fig. 490. — Bobine de M. Ruhmkorff.

forme une grosse bobine S, terminée par deux disques de verre qui servent à l'isoler. — Dans l'un des modèles construits par M. Ruhmkorff, le fil inducteur a 40 mètres de longueur et 2 millimètres de diamètre: l'une de ses extrémités est fixée à la colonne métallique D, l'autre à la colonne F (*fig.* 490 et 491) ; le fil induit n'a que $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre et fait de 25 à 30,000 tours ; ses deux extrémités traversent le disque de verre de droite, et s'attachent aux boutons B et C qui sont portés sur deux colonnes de verre isolantes. Les deux fils sont isolés avec soin l'un de l'autre, par une enveloppe de coton imprégné de gomme-laque. — Vers la gauche de l'appareil on voit, sur les deux figures, un *commutateur* particulier qui sert à établir ou à interrompre à volonté la communication métallique entre les colonnes D et F d'où part le fil inducteur ; il permet aussi de faire entrer à volonté le courant de la pile par l'une quelconque de ces colonnes et de le faire sortir par l'autre : les fils de la pile s'attachent aux deux boutons R et R' (*fig.* 491) du commutateur. — Sur la droite de

l'appareil se trouve l'*interrupteur*, destiné à produire, par ses vibrations rapides, les alternatives de cessation et de rétablissement du courant inducteur. Il se compose : 1° d'une *enclume e* (*fig.* 490), petit cylindre métallique vertical qui communique avec le commutateur par une bande métallique représentée sur la figure 491 ; 2° d'un *marteau o*, dont la tête, formée d'un morceau de fer doux, est placée au-dessous de l'extrémité

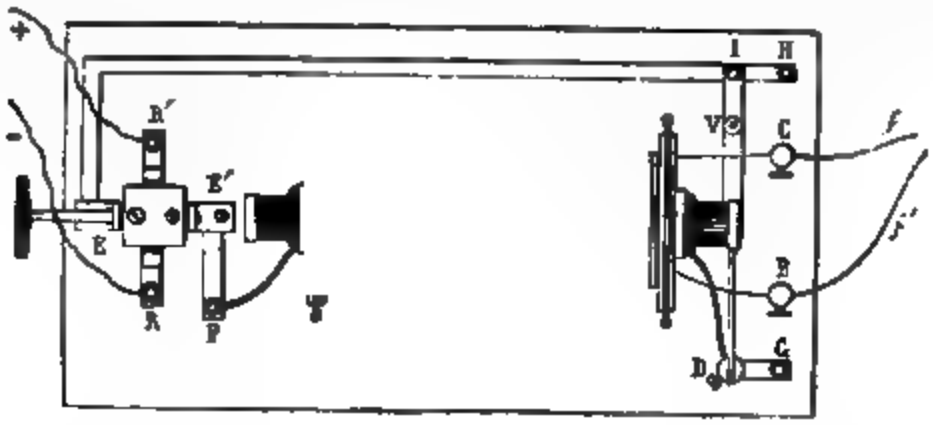


Fig. 491.

saillante du faisceau de fils de fer. — Un fil de cuivre sert à assurer la communication du manche du marteau et de la colonne métallique D, d'où part le fil inducteur. La face inférieure de la tête du marteau et la face supérieure de l'enclume sont garnies d'une plaque de platine.

Supposons les boutons B et C, où se termine le fil induit, réunis par un arc conducteur ; attachons les rhéophores de la pile en R et R' (*fig.* 491), et tournons le commutateur de manière à faire communiquer R' avec la colonne F, et R avec l'extrémité E de la bande métallique qui porte l'enclume. Le marteau reposant sur l'enclume, le circuit inducteur se trouve fermé ; le courant de la pile, arrivant en F, traverse donc la bobine, ressort en D, traverse l'interrupteur et revient en R par la bande métallique. Mais alors le faisceau de fils de fer s'aimante, attire la tête du marteau et rompt ainsi le circuit inducteur ; cette rupture détermine la cessation du magnétisme, en sorte que le marteau retombe sur son enclume. Le courant conducteur se trouvant rétabli, les mêmes alternatives se reproduisent indéfiniment. — Il se produit ainsi, dans un temps très-court, un nombre très-grand de ruptures et de rétablissements du courant de la pile. Or, à chaque *rupture*, il se développe dans le fil induit un courant *direct* ; à chaque *rétablissement*, un courant *inverse* : on a donc, dans le conducteur *ff*, qui ferme le circuit induit, une succession de courants, dirigés alternativement dans un sens et dans l'autre, et ces courants sont considérablement renforcés par l'action magnéto-électrique qui s'ajoute à l'action volta-électrique.

Enfin, M. Fizeau a montré qu'on augmente beaucoup la puissance de la machine en y ajoutant un *condensateur* à grande surface, interposé dans

le circuit inducteur. — Ce condensateur consiste en une série de feuilles d'étain, placées à l'intérieur du socle de bois qui supporte la bobine, et séparées entre elles par des feuilles de papier ciré; le papier ciré constitue la lame isolante, et les feuilles d'étain sont les armatures qui sont mises chacune en communication avec l'un des bouts du fil de la spirale inductrice. Les courants directs de rupture acquièrent ainsi une intensité beaucoup plus grande.

629. **Effets de l'appareil de M. Ruhmkorff.** — Les effets que réalise l'appareil de M. Ruhmkorff manifestent d'une manière frappante l'énorme intensité des courants induits.

Les *commotions* qu'on obtient en produisant le courant inducteur au moyen d'un seul élément de Bunsen, et adaptant aux boutons B et C des poignées métalliques que l'on saisit aves les mains humides, sont à peine supportables; avec un plus grand nombre d'éléments, elles peuvent devenir dangereuses. — Il suffit même, pour éprouver une forte commotion, de toucher le bouton C qui correspond à l'extrémité du fil induit qui est la plus éloignée de l'axe de la bobine.

Si l'on fixe aux deux colonnes B et C deux gros fils de cuivre f, f', terminés en pointes, on peut faire éclater entre eux des étincelles à plusieurs centimètres de distance. La distance d'explosion augmente d'ailleurs beaucoup dans un gaz raréfié, ou dilaté par la chaleur; c'est ainsi qu'on peut augmenter la longueur des étincelles en plaçant entre les extrémités des fils la flamme d'une lampe à alcool. — M. Poggendorff a montré que ces étincelles sont dues exclusivement au courant *direct* produit au moment de la *rupture* du courant inducteur; le courant *inverse* n'a pas une tension suffisante pour franchir une distance appréciable sans le secours d'un conducteur métallique.

M. Ruhmkorff construit aujourd'hui des machines bien plus puissantes que celles dont nous avons indiqué plus haut les dimensions : le fil induit a jusqu'à 120,000 mètres de longueur; les étincelles jaillissent à 40 ou 50 centimètres de distance, et se succèdent avec un fracas comparable à celui d'une série de décharges d'armes à feu. Il est à peine besoin de dire qu'une seule de ces étincelles serait foudroyante. Avec ces machines, on parvient à charger à saturation, en *quelques secondes*, une batterie électrique d'un grand nombre de jarres.

630. **Interrupteur de Foucault.** — L'interrupteur à marteau que nous avons décrit plus haut (628) présenterait, avec les bobines de grandes dimensions, des inconvénients qui en rendraient l'usage impossible. Au moment où le marteau se soulève, la rupture du courant inducteur produit une étincelle, à laquelle l'extra-courant donne une très-grande intensité dans les machines un peu puissantes (621) : en même temps, il y a arrachement de particules de platine, qui empêchent l'interruption du courant d'être aussi brusque qu'elle devrait l'être; en outre, les surfaces de l'enclume et du marteau sont rapidement détériorées.— L'inter-

rupteur de Foucault (*fig.* 492) évite ces divers inconvénients et peut être employé avec les bobines les plus puissantes.

Deux pointes de platine T, S sont fixées au voisinage d'une des extrémités de la tige TF qui est supportée en E par une lame élastique verticale : ces deux pointes viennent affleurer à la surface du mercure qui est contenu dans deux godets de verre et couverts d'une couche d'alcool absolu : à l'autre extrémité de la tige est une armature de fer F, placée à une petite distance d'un électro-aimant. Le fil de cet électro-aimant Q communique avec l'un des pôles d'une petite pile spéciale, formée d'un ou deux éléments de Bunsen : le godet de la pointe S communique, par le fil P, avec l'autre pôle de cette même pile. Le godet de la pointe T et le levier qui porte cette pointe sont introduits dans le circuit inducteur de la bobine, par les fils A et N. — Dès lors, le circuit de la pile spéciale de l'interrupteur étant fermé, l'armature F est attirée par l'électro-aimant, et l'extrémité T du levier, en se relevant, fait sortir les pointes du mercure et interrompt les deux circuits : mais, l'électro-aimant ayant alors perdu son aimantation, le levier est ramené en sens contraire par l'élasticité de la lame qui le supporte, les deux circuits sont de nouveau fermés, et ainsi de suite. — L'alcool est très-mauvais conducteur, l'interruption du circuit inducteur de la bobine est instantanée, et par suite l'intensité des courants induits est aussi grande que possible.

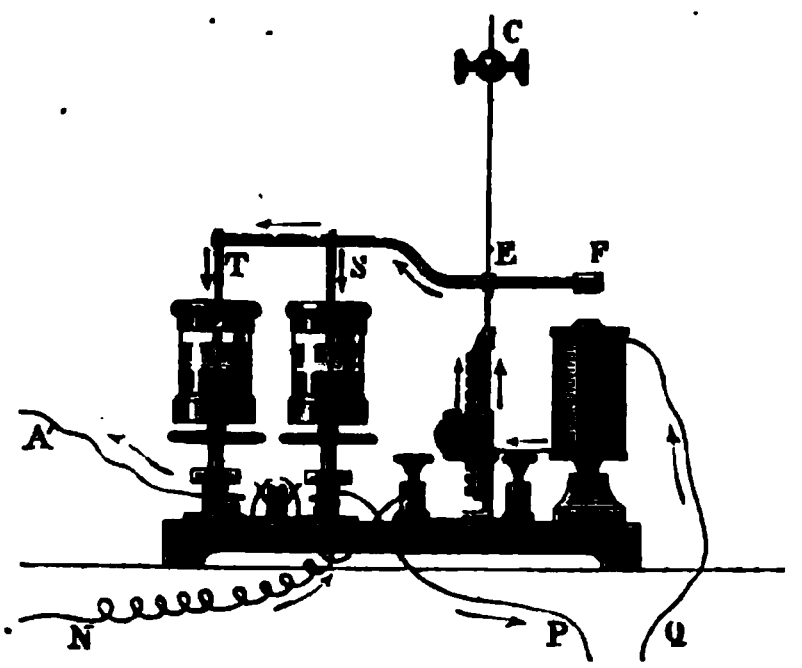


Fig. 492. — Interrupteur de Foucault.

* 631. **Effets lumineux produits par le passage des courants induits dans les gaz raréfiés.** — En faisant passer dans l'œuf électrique (471) le courant induit de l'appareil de M. Ruhmkorff, on obtient des *effets lumineux* d'une grande beauté.

Si le vide a été fait à 2 ou 3 millimètres, au moment où l'on met les garnitures métalliques de l'œuf en communication avec les deux extrémités du fil induit, on voit apparaître une gerbe de lumière rouge entre les deux boules. Si le courant direct, c'est-à-dire celui des deux courants induits qui est de même sens que le courant inducteur, va de la boule supérieure à la boule inférieure, la gerbe rouge part de la boule supérieure, où elle a son maximum d'éclat ; la boule inférieure est entourée d'une triple couche de lumière violette, teintée de bleu. — Si, au moyen du commutateur, on intervertit le courant, la gerbe part de la boule inférieure, et l'auréole violette apparaît autour de la boule supérieure.

Si, avant de faire le vide, on a introduit dans l'œuf électrique des vapeurs d'un liquide volatil (alcool, éther, essence de térébenthine), la gerbe lumineuse subit une modification remarquable. Au lieu d'être continue, elle se montre composée d'une succession de couches

Fig. 493. Fig. 494. Fig. 495.

alternativement brillantes et obscures (*fig.* 493). Le phénomène se ma-

nifeste d'autant mieux que l'on augmente davantage l'amplitude des oscillations de l'interrupteur.

Des effets analogues se produisent, avec un éclat remarquable, dans ces tubes de verre que l'on désigne sous le nom de *tubes de Geissler*, et que construit maintenant, à Paris, M. Alvergniat, avec une grande perfection. Ces tubes contiennent des gaz ou des vapeurs très-raréfiées; ils ont été fermés à la lampe : leurs extrémités laissent passer des fils de platine, qui servent à mettre l'appareil en rapport avec les deux bouts de la spirale induite. Dès que le courant passe, le tube est parcouru par un flot de lumière électrique, dont la couleur et l'aspect dépendent, en particulier, de la nature du gaz ou de la vapeur introduite, de la pression qui existe dans l'appareil, de la nature même du verre qui forme le tube et de la forme qu'on lui a donnée. — La figure 494 représente l'un de ces appareils, formé d'une partie étroite C en son milieu, et de deux parties beaucoup plus larges aux extrémités ; les fils de platine A, B, qui servent à transmettre le courant de la bobine, sont soudés à des fils d'aluminium beaucoup plus gros, qui ont l'avantage de ne pas se désagréger par le passage du courant, en produisant une poussière métallique qui noircit le tube, comme cela arrive avec des électrodes de platine. Le tube figuré ci-contre contient de l'hydrogène, raréfié à une pression de quelques millimètres : dans toute la partie étroite C, le gaz devient extrêmement brillant, et acquiert un éclat d'un rouge magnifique : les parties larges sont occupées par des stratifications lumineuses, séparées par des espaces relativement obscurs, comme le montre la figure. Enfin, les deux fils qui transmettent le courant présentent des aspects complétement différents : celui qui communique avec le conducteur négatif de la bobine est entouré d'une gaine lumineuse dans la largeur, et les stratifications ne commencent, dans le tube large qui le contient, qu'à une assez grande distance de son extrémité ; au contraire, le fil qui communique avec le conducteur positif de la bobine ne présente pas de gaîne lumineuse (*) et les stratifications du tube large qui le contient commencent à l'extrémité même du fil, par un point très-brillant. — Les couleurs que prennent le gaz dans les tubes de ce genre dépendent essentiellement de la nature des gaz eux-mêmes, et l'intensité lumineuse varie avec la pression sous laquelle ils ont été fermés. Ces tubes sont particulièrement employés pour l'étude spectrale de la lumière ainsi produite, comme on l'indiquera plus loin : la partie étroite surtout, quand on l'examine au spectroscope, fournit des spectres lumineux d'une grande richesse : chaque gaz présente un spectre caractéristique, en sorte que les traces les plus faibles de gaz étrangers se manifestent immédiatement par les modifications qu'on observe dans le spectre.

(*) L'absence de gaîne lumineuse autour de ce fil s'observe surtout quand le circuit électrique présente une petite interruption en dehors du tube lui-même, de manière qu'il se produise de petites étincelles dans ce point extérieur.

On a donné aux tubes de Geissler les formes les plus diverses, et l'on a pu augmenter encore la beauté des effets lumineux en employant des verres qui acquièrent, par fluorescences, des teintes diverses au moment du passage du courant. La figure 495 représente un tube large, contenant de l'air raréfié, et dans lequel on a soudé, au voisinage de ses extrémités, deux portions de tubes beaucoup plus étroits, avec des renflements sphériques de distance en distance : ces portions étroites s'ouvrent, en regard l'une de l'autre, dans le tube large, vers sa portion moyenne ; les renflements sphériques, en verre d'urane, acquièrent, au moment du passage du courant, une teinte verte qui contraste avec la couleur rosée des stratifications brillantes qu'on observe dans le tube étroit et des stratifications plus pâles qui se produisent dans les parties du tube que le courant traverse

La figure 496 représente un tube contenant encore de l'air raréfié, et formé d'une série de boules réunies entre elles par des tubes étroits ; chacun des tubes de jonction pénètre à l'intérieur de la boule qui lui

Fig. 496. — Tube de Geissler.

succède, et s'y ouvre par une partie effilée. La figure montre que le flot de lumière stratifiée qui remplit les parties étroites semble se déverser de l'extrémité de chaque pointe dans l'ampoule qui la contient, en allant du fil qui communique avec le conducteur positif de la bobine vers le fil qui communique avec le conducteur négatif. — Les particularités de ces divers phénomènes sont, encore aujourd'hui, restés sans une explication satisfaisante.

LIVRE QUATRIÈME

ACOUSTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON

---

632. **But de l'acoustique.** — L'*acoustique* a pour objet l'étude du son, et la recherche des lois qui en régissent la production ou la propagation dans l'air et dans les différents milieux.

633. **Tout son est le résultat d'un mouvement déterminé dans un corps matériel.** — Une corde étant tendue entre deux points fixes, si l'on vient à l'écarter et à l'abandonner ensuite à elle-même, elle exécute, de part et d'autre de sa position d'équilibre, une série d'allées et de venues, dont la succession constitue un *mouvement vibratoire*. L'ensemble d'une allée et d'une venue est ce qu'on nomme une *vibration* (*).

Si la corde est faiblement tendue, l'œil distingue chaque allée et venue, et l'oreille ne perçoit encore aucun son. Si l'on vient à augmenter progressivement la tension, les vibrations deviennent de plus en plus rapides, et il arrive un moment où le son devient perceptible ; à ce moment, il n'est plus possible de distinguer isolément les allées et venues successives de la corde, mais elle semble éprouver une sorte de gonflement, qui est maximum vers son milieu, et qui est dû à la persistance des impressions qu'elle produit sur notre œil dans ses diverses positions.

(*) Dans quelques ouvrages, le mot *vibration* désigne seulement une allée ou une venue de la corde, ou en général d'un corps sonore quelconque. Nous n'adopterons pas cette définition, qui est aujourd'hui abandonnée par la plupart des auteurs.

Pour constater les vibrations d'une cloche A (*fig.* 497), ou d'un timbre, auxquels on a fait rendre un son en les frappant avec un marteau ou en les frottant avec un archet, il suffit d'en approcher une petite pointe métallique *p*, ou une petite balle métallique suspendue à un fil : il se produit alors une succession rapide de chocs, qui se prolonge aussi longtemps que le son lui-même.

Le son des instruments à vent, tels que les tuyaux d'orgue ou la flûte, résulte aussi d'un mouvement vibratoire ; nous démontrerons plus loin que ce mouvement réside dans la masse d'air que contient le tuyau.

Fig. 497.

q. 634. **Le son ne peut se transmettre dans le vide.** — Le son ne peut parvenir à notre oreille, qu'autant qu'il lui est transmis par l'intermédiaire d'un milieu matériel et élastique. — On le démontre par les expériences suivantes.

Sur la platine de la machine pneumatique, on dispose un coussinet de laine, et sur celui-ci un timbre T, que frappe un marteau *a* (*fig.* 498) mû par un mécanisme d'horlogerie. On recouvre le tout d'une cloche, et l'on fait le vide. A mesure que l'air se raréfie sous le récipient, le son du timbre s'affaiblit de plus en plus, et bientôt il cesse entièrement d'être

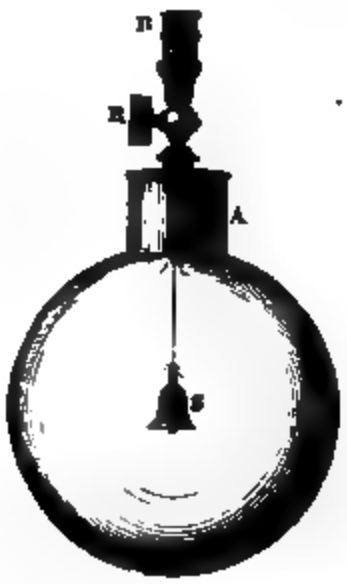


Fig. 498. Fig. 499.

perceptible. Si on laisse rentrer l'air, le son renaît peu à peu et reprend enfin son intensité primitive. — On varie quelquefois cette expérience, en remplaçant le timbre par une petite clochette S (*fig.* 499), suspendue

par un fil de lin au centre d'un ballon à robinet. Le vide étant fait, si l'on agite l'appareil, aucun son n'arrive à l'oreille ; la perception acquiert au contraire une netteté de plus en plus grande quand on y laisse rentrer progressivement de l'air, un gaz quelconque ou une vapeur.

Les observations faites dans les ascensions aérostatiques et sur les hautes montagnes, où l'air est plus rare que dans les plaines basses et dans les vallées, viennent confirmer ces résultats. D'après de Saussure, un coup de pistolet fait moins de bruit au sommet du mont Blanc qu'un pétard tiré dans la plaine ; Gay-Lussac raporte que, dans son voyage aérien de 1804, l'intensité de sa voix fut extrêmement affaiblie lorsqu'il se trouva à 7000 mètres de hauteur dans l'atmosphère.

635. **Transmission du son par les divers milieux pondérables.** — L'air est le véhicule ordinaire des sons ; mais nous venons de voir que les autres gaz et les vapeurs peuvent également transmettre le son jusqu'à l'oreille. — Les liquides jouissent de la même propriété. On sait que les plongeurs entendent ce qui se dit sur le rivage ; on sait aussi que les poissons s'effrayent des moindres bruits qui se produisent dans l'eau ou à sa surface. — Enfin, le son se propage dans les corps solides : souvent on distingue le roulement d'une voiture éloignée, en appliquant l'oreille contre terre ; dans les travaux de siége, le mineur entend, à une grande distance, les coups de marteau du mineur qu'on lui oppose ; enfin, en appuyant la tête contre l'extrémité d'une poutre de sapin, on perçoit le bruit produit par le choc d'une pointe d'épingle contre l'extrémité opposée.

636. **Vitesse de transmission du son dans l'air.** — Les premières expériences destinées à mesurer la vitesse de transmission du son dans l'air furent exécutées en 1738 aux environs de Paris, entre Montmartre et Montlhéry, par une Commission prise dans le sein de l'Académie des sciences. — Les résultats numériques obtenus alors ne présentèrent pas une grande exactitude ; les observateurs avaient négligé quelques causes d'erreurs, dont on a reconnu plus tard l'influence : mais ces expériences établirent au moins que *la propagation est uniforme*, c'est-à-dire que le son met un temps double, triple, quadruple à franchir dans l'air une distance double, triple, quadruple d'une distance donnée. — De là résulte que la *vitesse de transmission* du son dans l'air doit être définie *la distance à laquelle le son se transmet* à travers ce milieu *dans l'unité de temps* (2).

D'autres expériences, faites en 1822 par les membres du Bureau des longitudes, présentent un caractère de précision plus grand : elles eurent lieu entre Villejuif et Montlhéry. — A chacune des deux stations, était disposée une pièce de canon, autour de laquelle se tenaient des observateurs munis de chronomètres. Il fut convenu qu'un coup de canon serait tiré alternativement à l'une et à l'autre station, afin que la moyenne des résultats fût aussi indépendante que possible de la direction du vent. Les

expériences commencèrent à 11 heures du soir, le 21 juin; le vent était très-faible ; la température était de 16°. — A chaque station, on notait le moment où l'on apercevait la lumière de l'explosion produite à l'autre station ; on notait également l'instant où l'on entendait le bruit de la détonation. La lumière pouvant être considérée comme franchissant une distance de quelques kilomètres en un temps tout à fait négligeable, l'intervalle qui séparait ces deux instants mesurait le temps nécessaire à la transmission du son. — En divisant la distance des deux stations, savoir 18 612 mètres, par la moyenne de l'intervalle écoulé entre la lumière et le bruit de chaque explosion, savoir 54°,8, on obtint pour la vitesse du son, à la température de 16°, la valeur 340^m,9 par seconde.

La vitesse du son dans l'air est indépendante de la pression barométrique, comme le montre la concordance des résultats obtenus en opérant à des hauteurs très-différentes au-dessus du niveau de la mer.

Enfin, la vitesse de propagation est la même pour tous les sons, quelles que soient leur hauteur, leur intensité, etc. On sait, en effet, que les notes d'un morceau exécuté par un orchestre ne sont nullement altérées dans l'ordre de leur succession, quand on les écoute à une grande distance.

637. **Influence de la température sur la vitesse de transmission du son dans l'air.** — Pour déduire de la vitesse v observée à la température t, la vitesse v_0 dans l'air à la température zéro, on peut employer la formule suivante, qui a été donnée par Newton :

$$v_0 = \frac{v}{\sqrt{1 + \alpha t}},$$

formule dans laquelle α représente le coefficient de dilatation de l'air. En remplaçant v par sa valeur 340^m, 9 ; α par 0,00367 et t par 16°, on trouve $v_0 = 331^m,3$.

Inversement, connaissant la vitesse v_0, la même formule permettra de trouver la vitesse v à une température quelconque t.

638. **Vitesse du son dans quelques milieux.** — MM. Sturm et Colladon, en 1827, ont mesuré directement, et par un procédé tout semblable à celui qui vient d'être décrit, la vitesse de transmission du son dans l'eau. — Les expériences ont été faites sur le lac de Genève. Une cloche C (*fig.* 500), suspendue à un bateau B et plongée dans l'eau du lac, était frappée par un marteau b dont le manche sortait de l'eau ; le mouvement même du marteau produisait l'inflammation d'une certaine quantité de poudre placée en m, au moment où le choc avait lieu : la figure indique suffisamment la disposition fort simple que les observateurs avaient imaginée à cet effet. Au rivage opposé, on notait l'instant où l'on apercevait la lumière, et celui où arrivait le son transmis par l'eau : ce son était perçu à l'aide d'une sorte de *cornet acoustique*, fermé en fg par une membrane, et à l'extrémité supérieure o duquel on pouvait appliquer

l'oreille. — On trouva, pour la vitesse de transmission du son dans l'eau, à la température de 8°, 1, le nombre 1435 mètres par seconde.

On doit à Biot la détermination expérimentale de la vitesse du son dans la fonte de fer. — Un timbre avait été fixé à l'extrémité d'un système de

Fig. 500.

tuyaux de fonte (*), dont la longueur était 951m,25 ; on le frappait à un certain instant, de manière à lui faire rendre un son. Une personne appliquait son oreille à l'autre extrémité des tuyaux ; elle entendait distinctement, à 2 secondes et demie d'intervalle, deux sons successifs, le premier transmis par le métal, le second par l'air intérieur. — En désignant respectivement par a et x les vitesses du son dans l'air et dans la fonte, $\frac{951,25}{a}$ et $\frac{951,25}{x}$ représentaient les durées de la transmission par le gaz et par le métal, on avait donc :

$$\frac{951,25}{a} - \frac{951,25}{x} = 2,5.$$

En résolvant cette équation, on trouve que la valeur de x est à peu près dix fois et demie la valeur trouvée précédemment pour a, c'est-à-dire que le son se propage dix fois et demie aussi vite dans la fonte que dans l'air.

On verra plus loin comment on a pu déterminer les vitesses du son

(*) Ces tuyaux venaient d'être établis pour amener à Paris les eaux de la source d'Arcueil.

dans des substances autres que les précédentes, par une méthode indirecte, en se fondant sur les lois des vibrations des tuyaux sonores ou des verges élastiques.

639. **Propagation du son dans un tuyau cylindrique. — Ondes sonores.** — Pour comprendre comment s'effectue la propagation du son en général, il est bon d'étudier d'abord le cas où le son se produit et se propage dans un tuyau cylindrique : on passe ensuite facilement au cas où la propagation s'effectue dans un milieu indéfini.

Soit AB (*fig.* 501) un tuyau cylindrique indéfini, rempli d'air par exemple, et ayant une longueur très-grande par rapport à son diamètre : imaginons qu'une lame ou un piston très-mince *mn*, ayant une surface égale à la section intérieure du tuyau, exécute une série de vibrations isochrones entre deux positions extrêmes *mn* et *m'n'*.

Supposons que ce piston fasse sa *première demi-vibration*, de *mn* en *m'n'*, en un centième de seconde : cherchons ce qui doit se passer pendant cet intervalle de temps, dans la portion du tuyau qui est à droite de *mn*. — Le piston pousse devant lui la tranche d'air qui le touche, celle-ci pousse la suivante, et ainsi de suite ; mais cette communication de mouvement n'est pas instantanée, en sorte que, au moment *où le* piston atteint la position *m'n'*, le mouvement communiqué à l'air par le piston est parvenu seulement à une certaine tranche *pq*, et le gaz qui est à droite de *pq* est encore en repos. A cet instant, la vitesse est nulle

Fig. 501.

en *m'n'*, puisque c'est la limite de l'excursion du piston ; elle est nulle aussi en *pq*, puisque le mouvement communiqué au départ arrive seulement à cette tranche ; entre *m'n'* et *pq*, les tranches successives sont animées de vitesses déterminées, généralement croissantes d'abord, puis décroissantes. — L'air de chacune de ces tranches éprouve d'ailleurs une compression, car le gaz qui occupait primitivement le volume *mnpq* est réduit maintenant au volume *m'n'pq* ; mais en *m'n'* et en *pq* la compression est nulle, aussi bien que la vitesse ; de *m'n'* à *pq* les compressions vont en général d'abord en croissant, puis en décroissant : nous pourrons les représenter, en grandeur, par des perpendiculaires élevées dans un même plan à l'une des arêtes du cylindre, et la courbe *m'ap*, qui joint les extrémités de ces perpendiculaires, représentera les compressions des tranches considérées. — La colonne d'air *m'n'pq*, à laquelle le mouvement du piston s'est communiqué pendant que ce piston exécutait sa première demi-vibration, s'appelle une *demi-onde condensée*. La distance *m'p* s'appelle la *demi-longueur d'onde*.

Supposons, pour un moment, que le piston mobile, arrivé en $m'n'$, cesse complétement de se mouvoir : en vertu des vitesses qu'elles ont acquises et des compressions qu'elles ont éprouvées, les tranches comprises entre $m'n'$ et pq tendent à pousser devant elles les tranches qui sont à droite de pq; le mouvement se propage donc au delà de ce plan. L'analyse mathématique démontre que *la demi-onde condensée se transporte successivement, et avec une vitesse constante, dans toute la longueur du tuyau*; cette vitesse de transmission est précisément celle avec laquelle le son se transmet dans l'air atmosphérique. — Il est essentiel de bien comprendre le sens de cette proposition : ce sont les vitesses et les compressions des tranches successives de la demi-onde qui se déplacent dans le tuyau, et non ces tranches elles-mêmes. Chaque tranche, en vertu des impulsions qu'elle reçoit, se déplace, il est vrai, mais d'une quantité très-petite pour transmettre à la tranche suivante la compression qu'elle a reçue, après quoi elle retombe au repos. — Si donc nous prenons sur l'arête du cylindre des longueurs pp', $p'p''$, etc., égales à $m'p$, les positions successives de la demi-onde condensée, au bout de 2, 3, etc. centièmes de seconde, seront représentées par $pqp'q'$, $p'q'p''q''$, etc.

On démontrerait, par des considérations semblables, que, pendant ce mouvement du piston de mn en $m'n'$, il se produit à gauche de $m'n'$ une *demi-onde dilatée* $m'n'rs$, dont la longueur $m'r$ est égale à $m'p$; chaque tranche de cette demi-onde possède, au bout d'un centième de seconde, une vitesse dirigée dans le sens de celle du piston, en même temps qu'elle subit une certaine dilatation. Si l'on représente ces dilatations, à ce moment, par des perpendiculaires menées au-dessous de l'arête du cylindre, on a une courbe telle que $m'br$, pour figurer l'état de l'air dans cette partie du tuyau. Puis, dans les instants qui suivent, la demi-onde dilatée se transporte de droite à gauche, avec une vitesse égale à la vitesse de propagation du son; c'est-à-dire qu'elle se déplace, au bout de chaque centième de seconde, d'une quantité égale à une demi-longueur d'onde, vers l'extrémité gauche du tuyau.

Revenons maintenant au cas où le piston, parvenu en $m'n'$, rebrousse chemin et *revient vers sa position initiale* mn en reprenant, dans un ordre inverse et en sens contraire, les vitesses successives dont il avait été animé dans sa première demi-vibration; il emploie un centième de seconde à repasser de $m'n'$ en mn. Au bout de ce temps, la demi-onde condensée qui avait pris naissance à droite du piston, et la demi-onde dilatée à gauche, se sont transportées respectivement dans les positions $pqp'q'$ et $rsr's'$ (*fig.* 502), de plus, il s'est formé une demi-onde dilatée dans la portion $mnpq$, et une demi-onde condensée dans la portion $mnrs$; les vitesses des tranches d'air, dans ces deux régions, sont d'ailleurs dirigées de droite à gauche, comme la vitesse du piston lui-même. — Donc, après une vibration *complète*, on trouve, à droite de mn, une *onde entière* $mnp'q'$; à gauche, une onde entière $mnr's'$; chacune d'elles

se compose d'une demi-onde condensée et d'une demi-onde dilatée. On nomme *longueur de l'onde*, ou *longueur d'ondulation*, la distance *mp'* ou *nr'* à laquelle le mouvement s'est propagé pendant que le piston a accompli une vibration.

On voit donc que, *après un nombre entier quelconque de vibrations*, on aura, à droite de *mn*, une série de demi-ondes alternativement dilatées

Fig. 502.

et condensées; à gauche de *mn*, une série de demi-ondes alternativement condensées et dilatées. Les compressions ou dilatations respectives des tranches d'air peuvent être d'ailleurs représentées par des courbes semblables à celles que montre la figure.

Il est maintenant facile de se rendre compte des phénomènes qui se succèdent *dans une tranche quelconque du tuyau*, en *ik* par exemple. — La figure 502 représente cette tranche pendant qu'elle fait partie d'une demi-onde condensée, c'est-à-dire pendant qu'elle est traversée par une demi-onde dans laquelle les vitesses d'ébranlement sont dirigées de *gauche* à droite; cette demi-onde emploie un centième de seconde à traverser le plan de la tranche *ik* : cette tranche est donc animée, pendant un centième de seconde, d'une vitesse de grandeur variable, mais dirigée toujours de gauche à droite. Une demi-onde dilatée, produite par le retour du piston de *m'n'* en *mn*, arrive ensuite en *ik* : elle emploie également un centième de seconde à traverser le plan de cette tranche, et, pendant ce nouvel intervalle de temps, *ik* est animée d'une vitesse de grandeur variable, mais dirigée toujours de droite à gauche, et ainsi de suite. — En définitive, *une tranche quelconque du tuyau vibre comme le piston lui-même*, entre deux positions extrêmes, peu distantes l'une de l'autre ; *la durée de la vibration de cette tranche est égale à la durée de la vibration du piston* (*).

640. **Propagation du son dans un milieu indéfini. — Rayons sonores.** — Lorsque le son se produit en un point A d'un milieu homogène indéfini, l'expérience montre que les vibrations du corps sonore se propagent avec une vitesse constante dans toutes les directions. Pendant la première vibration, le mouvement se communique donc à tous les points d'une sphère décrite du point A comme centre, et qu'on nomme l'*onde sonore;* le rayon de cette sphère mesure la *longueur d'ondulation*.

(*) Les explications précédentes peuvent également rendre compte de la propagation du mouvement vibratoire dans un tuyau cylindrique rempli d'un liquide. Toutefois, comme elles supposent la compressibilité du fluide qui transmet le son, il est nécessaire, pour les étendre aux liquides, d'établir que les liquides sont compressibles.

— Ce mouvement dû à la première vibration s'éloigne ensuite du point A, de manière à se trouver toujours limité entre deux surfaces sphériques concentriques, dont la différence des rayons reste égale à la longueur d'ondulation.

L'analyse mathématique démontre que, en chaque point de la surface de l'onde, les vibrations sont normales à cette surface; si donc, par le point A où le son est produit, on mène une droite quelconque, toutes les

Cette proposition, énoncée plus haut d'une manière sommaire (Note de la page 20), se démontre au moyen du *piézomètre* d'Œrsted.

Sur une planchette de métal (*fig.* 503) est fixé un réservoir de verre D, terminé par un tube capillaire qui s'élargit en entonnoir à son extrémité supérieure. Le réservoir et le tube sont entièrement pleins d'eau purgée d'air, et l'on a déposé une petite goutte de mercure dans l'entonnoir. On introduit cet appareil dans un cylindre de verre AB très-résistant, assujetti à la partie inférieure dans une monture de métal et muni à la partie supérieure d'une douille C, contenant un piston plein P, qu'on peut faire mouvoir au moyen de la vis V. — Pour faire une expérience, on soulève autant que possible le piston, et l'on verse de l'eau par l'entonnoir E, de manière à emplir complétement le cylindre AB; l'air s'échappe par la petite ouverture I. On fait ensuite descendre le piston : l'ouverture I se trouve alors fermée, et, si l'on continue à tourner la vis, le piston exerce sur l'eau une pression qui se transmet dans tous les sens, et en particulier, par l'intermédiaire du mercure, au liquide du réservoir. Elle s'exerce d'ailleurs également sur la surface interne et sur la surface externe de l'enveloppe, on peut donc admettre que la capacité du réservoir ne varie que d'une très-petite quantité. De là résulte que, si l'eau est compressible, l'index mercuriel doit descendre dans le tube capillaire. — Or l'expérience démontre qu'il en est ainsi, et cela quel que soit le liquide introduit dans le réservoir D : donc, *tous les liquides sont compressibles*.

Le même appareil peut servir à mesurer approximativement la fraction de son volume initial dont un liquide se comprime sous une pression déterminée. A cet effet, le tube capillaire a été divisé en parties d'égal volume, et l'on a préalablement cherché le rapport entre la capacité du réservoir et celle d'une division de ce tube : on a fixé aussi à la planchette MN un manomètre à air comprimé, consistant en un tube de verre gradué FG, ouvert en bas et fermé en haut; il sert à mesurer la pression, par la diminution de volume de l'air qu'il contient. Enfin, un thermomètre E permet de s'assurer si la température est restée constante pendant l'expérience. — On a reconnu que l'eau se comprime de 0,00005 environ de son volume, pour un accroissement de pression égal à une atmosphère.—La compressibilité du mercure est un peu supérieure à la moitié de celle de l'eau.

Fig. 503.

molécules que cette droite rencontre vibrent suivant sa propre direction; on peut donc dire que le son se propage suivant toute direction rectiligne partant du corps sonore, comme il le ferait dans un tuyau cylindrique dont l'axe coïnciderait avec cette direction. — On donne le nom de *rayon sonore* à toute droite partant d'un corps sonore, et suivant laquelle le son se propage.

641. **Diminution graduelle d'intensité d'un son qui se propage dans un milieu indéfini : conservation de l'intensité dans un tuyau cylindrique.** — Quand la propagation du son se fait dans un milieu indéfini, le volume compris entre les deux surfaces sphériques qui limitent l'onde sonore augmente à mesure que cette onde s'éloigne du centre; on conçoit donc que les vibrations doivent diminuer rapidement d'amplitude, et, par suite, que l'intensité du son doive décroître à mesure qu'on s'éloigne du point où il a été produit ; c'est ce que confirment les observations les plus simples.

Dans un tuyau cylindrique, au contraire, l'onde conserve un volume constant, et, si les frottements sur les parois du tuyau ne détruisaient une partie du mouvement, le son conserverait toujours la même intensité, quelle que fût la longueur du tuyau. — Bien qu'il n'en soit pas rigoureusement ainsi, et que les sons éprouvent, en réalité, une certaine diminution d'intensité en se propageant dans les tuyaux, cette diminution est toujours beaucoup moindre que dans un milieu indéfini. — Tout le monde connait maintenant l'usage des *tubes parlants* qui sont employés pour transmettre, à des distances quelquefois très-grandes et au travers des murs ou des planchers qu'ils traversent, les paroles prononcées à l'une de leurs extrémités.

642. **Relation entre la vitesse du son et la longueur de l'onde sonore.** — Lorsqu'un son est produit par un corps vibrant à l'ouverture d'un tuyau cylindrique contenant de l'air, la première vibration détermine la formation d'une onde qui se propage dans le tuyau avec une vitesse égale à la vitesse de transmission du son dans l'air. Au bout d'une seconde, l'extrémité antérieure de cette onde se trouve donc à 340 mètres environ du corps sonore; or, si pendant ce temps le corps vibrant a exécuté 60 vibrations, comme chaque vibration donne naissance à une onde, la longueur 340 mètres peut se décomposer en 60 parties égales, dont chacune comprend une onde. — Le même raisonnement s'applique au cas où le son se propage dans un milieu indéfini.

En général, soit v la vitesse de transmission du son dans un milieu quelconque, n le nombre de vibrations exécutées par un corps sonore pendant une seconde, et l la longueur de l'onde produite, on aura :

$$v = nl.$$

Cette relation, dont nous ferons fréquemment usage, permet de trouver

l'une quelconque des trois quantités v, n, l, lorsqu'on connaît les deux autres.

643. **Qualités ou caractères distinctifs des sons.** — L'oreille distingue dans les sons trois qualités ou caractères différents : la *hauteur musicale*, l'*intensité* et le *timbre*.

Hauteur musicale. — Il est possible de compter très-exactement le nombre des vibrations exécutées par un corps sonore dans un temps déterminé, au moyen de divers appareils que nous décrirons plus loin. En effectuant ces déterminations pour des corps produisant des sons divers, on a reconnu que le son est d'autant plus *aigu* que le nombre des vibrations exécutées dans le même temps est plus considérable. — On peut donc prendre, pour *mesure de la hauteur* musicale d'un son, le *nombre des vibrations exécutées dans l'unité de temps*, dans une seconde par exemple.

Intensité. — L'intensité d'un son dépend de l'*amplitude des vibrations*. Il est facile de s'en assurer en faisant vibrer une corde de piano ou de harpe : si l'on écarte cette corde de sa position d'équilibre, et qu'on l'abandonne ensuite à elle-même, elle rend un son qui diminue graduellement d'intensité; en même temps, on voit décroître successivement les amplitudes des vibrations.

Timbre. — Deux sons de même hauteur et de même intensité peuvent différer l'un de l'autre par une troisième qualité, qu'on nomme le timbre. C'est par la différence des timbres qu'on distinguera toujours les sons d'une trompette, de ceux d'un violon ou d'une voix humaine, lors même qu'ils auraient même hauteur musicale et même intensité. — Les causes de ces différences sont assez complexes : nous y reviendrons plus loin.

644. **Des bruits.** — On désigne quelquefois sous le nom de *bruits*, des sons d'une durée très-courte, et dont la sensation est assez vague pour que l'oreille puisse difficilement en apprécier la hauteur musicale : tel est le son que produit ordinairement le choc de deux corps, l'explosion d'une arme à feu, etc.

Il ne semble pas que le caractère de la hauteur constitue une différence essentielle entre le son proprement dit et le bruit ; on peut, en effet, en faisant varier convenablement les dimensions des corps ébranlés, obtenir des bruits dont l'ensemble ou la succession produise des accords musicaux, même pour une oreille peu exercée. Dans la plupart des cabinets de physique, on trouve une collection de huit planchettes de bois qui donnent, lorsqu'on les laisse tomber l'une après l'autre, la succession des sons de la gamme.—On verra plus loin comment les expériences effectuées par M. Helmholtz, sur les causes auxquelles on doit attribuer les différences de timbre des divers sons, semblent permettre d'établir, entre les bruits et les sons musicaux proprement dits, une différence plus précise.

645. **Détermination expérimentale du nombre des vibrations d'un son. — Sirène.** — La *sirène* imaginée par Cagniard de Latour est destinée à compter les nombres de vibrations qui correspondent à des sons de hauteur déterminées.

L'appareil est représenté dans son ensemble, en vue perspective, par la figure 504 et en coupe verticale par la figure 505. — B est une caisse cylindrique de laiton, dans laquelle on peut insuffler de l'air par le tube F qui s'adapte à l'une des ouvertures de la soufflerie représentée par la figure 515. La base supérieure de la caisse est un plateau circulaire fixe *tt*, percé d'un certain nombre de trous O, O, lesquels sont également espacés sur une circonférence concentrique avec celle du plateau : c'est par ces trous que le vent s'échappe. Au-dessus du plateau *tt*, et à une très-petite distance, se trouve un *plateau mobile* SS, fixé à un axe d'acier qui peut tourner dans de petites cavités pratiquées aux extrémités des vis G et V. Ce plateau SS est aussi percé de trous *o,o*, en nombre égal à

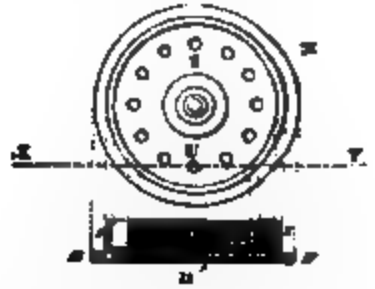


Fig. 504. Fig. 505. Fig. 506.

ceux de la base *tt*, et correspondant exactement à ces derniers; toutes ces ouvertures sont dirigées obliquement aux plans des deux plateaux, comme le montre la figure 506 : *u* et *u'* représentent, sur cette figure, les sections verticales de deux ouvertures correspondantes; U indique leur disposition en projection horizontale; les axes de ces ouvertures sont dans un plan perpendiculaire au rayon du plateau ; elles sont inclinées en sens contraire l'une de l'autre dans ce plan.

Si les trous du plateau mobile sont placés exactement au-dessus de ceux du plateau fixe, l'air pourra s'écouler par chacun des canaux coudés *u'u* (*fig.* 506); mais cet air, arrivant dans une direction à peu près normale à la paroi du canal *u*, exerce une pression sur elle, et la composante horizontale de cette pression fait mouvoir le plateau SS, en sens

inverse de la direction du canal *u* lui-même. Le mouvement ainsi produit fait bientôt cesser la coïncidence des deux systèmes d'ouvertures : cette coïncidence se rétablit dès que le plateau SS, en vertu de sa vitesse acquise, a tourné d'un angle égal à celui qui correspond à l'intervalle de deux trous consécutifs; à cet instant, l'air peut s'échapper de nouveau et donner une nouvelle impulsion au plateau mobile, et ainsi de suite. Il est donc possible, en exerçant sur le soufflet une pression suffisante, par exemple en appuyant avec la main sur la tige DC (*fig.* 515), de rendre le mouvement de rotation aussi rapide qu'on voudra.

Lorsque, en opérant ainsi, on a atteint une vitesse assez grande, l'oreille commence à percevoir un son, dont la hauteur musicale s'élève à mesure que la vitesse augmente. — Pour nous rendre compte de la production de ce son, prenons, par exemple, une sirène portant 12 trous sur chacun de ses deux plateaux. Examinons d'abord quel serait l'effet produit, si, le plateau fixe ayant toujours 12 trous, le plateau mobile n'en avait qu'un seul; à chaque tour, ce trou unique viendrait se mettre successivement en coïncidence avec les 12 trous du plateau fixe : la sortie de l'air serait donc 12 fois établie et interrompue, et s'effectuerait toujours par une seule ouverture. A chaque coïncidence, cet air communiquerait une impulsion à l'air extérieur, lequel reviendrait en arrière, en vertu de son élasticité, aussitôt que la coïncidence cesserait : de là, un mouvement vibratoire dans l'air extérieur, et production d'un son. Si maintenant le plateau mobile porte 11 autres trous, au moment où le trou primitivement considéré établira une coïncidence, tous les autres correspondront aussi à des ouvertures du plateau fixe. Donc la sortie de l'air s'effectuera maintenant à la fois par les 12 ouvertures, mais le nombre des interruptions et des rétablissements sera toujours le même dans le même temps : l'intensité du son sera seulement augmentée.

Cela posé, pour déterminer, à l'aide de la sirène, le nombre de vibrations d'un son donné, du son rendu par un tuyau d'orgue, par exemple, on règle le vent de la soufflerie de manière à amener et à maintenir le son de la sirène à l'unisson de celui du tuyau, et l'on compte le nombre de coïncidences des deux systèmes d'ouvertures qui se produisent en un temps déterminé : c'est à quoi l'on arrive au moyen du *compteur* de la sirène. — L'axe du plateau mobile est muni, à sa partie supérieure, d'un filet de vis V*v* (*fig.* 505); ce filet engrène avec une roue dentée B qui porte 100 dents. A chaque tour du plateau, cette roue avance d'une dent : une aiguille fixée à son axe, et mobile sur un cadran (*fig.* 504) dont la circonférence est divisée en 100 parties égales, avance d'une division. Une deuxième roue dentée D (*fig.* 505), munie d'une aiguille qui se meut sur un autre cadran (*fig.* 504), est destinée à compter les centaines de tours : pour cela, on a fixé à l'axe de la roue B un appendice L*l*, dont l'extrémité L arrive en contact avec une dent de D chaque fois que la roue B a fait un tour entier; la roue D avance alors d'une dent, et l'ai-

guille qu'elle porte marche d'une division sur son cadran. Les indications des deux aiguilles peuvent donc, à un moment donné, faire connaître le nombre total des tours du plateau. Enfin, les axes des roues B et D sont assujettis à l'une des faces de la boîte rectangulaire qui les contient, celle qui est supposée en arrière sur la figure 504. Cette face peut recevoir un petit mouvement de gauche à droite ou de droite à gauche, suivant qu'on presse le bouton *r* ou le bouton R, de manière à faire engrener la roue B avec la vis V*v* ou à interrompre l'engrenage.

Pour faire une expérience, on désengrène d'abord, on place les deux aiguilles aux zéros de leurs cadrans, et l'on amène le son de la sirène à l'unisson de celui du tuyau. On presse alors le bouton *r* pour établir l'engrenage, et l'on note exactement cet instant sur une montre à secondes: on maintient l'unisson pendant plusieurs minutes, en réglant convenablement le vent de la soufflerie; c'est l'oreille qui doit guider dans cette opération. Enfin, on termine l'expérience en pressant le bouton R (*) et notant encore cet instant sur la montre. — Supposons que l'expérience ait duré 4 minutes 15 secondes, ou 255 secondes; que l'aiguille qui marque les tours soit sur la 95e division et l'aiguille des centaines sur la 22e: le plateau aura fait 2295×12 ou 27540 vibrations. On trouve ainsi que la sirène a produit, en une seconde, 108 vibrations: le tuyau, qui était à l'unisson avec elle, en a produit le même nombre.

Il est important de remarquer que l'aiguille des tours n'avance d'une division qu'après chaque tour entier du plateau, c'est-à-dire après un nombre de vibrations égal au nombre des trous. Le plateau ayant 12 trous, on voit que le nombre total des vibrations ne pourra être déterminé qu'à 12 unités près. On atténue l'erreur relative en prolongeant l'expérience aussi longtemps que possible : la seule difficulté que l'on rencontre consiste à maintenir le son constant pendant un grand nombre de secondes, ce à quoi on n'arrive qu'avec un peu d'exercice.

646. **Roues dentées.** — Les *roues dentées* ont été imaginées par Savart, pour servir également à la mesure des nombres de vibrations qui correspondent à des sons déterminés.

Ces roues sont généralement au nombre de quatre, fixées sur un même arbre horizontal (*fig.* 507); on communique un mouvement rapide à cet arbre au moyen d'une courroie sans fin ABCD, laquelle passe sur un grand volant muni d'une manivelle M. Un compteur, disposé comme celui de la sirène, fait connaître le nombre des tours que l'arbre exécute dans un temps donné. — On place, contre les dents de l'une des roues une carte qu'on appuie sur le support S. Cette carte, recevant une impression à chacun des chocs de la roue et revenant ensuite sur elle-même, détermine dans l'air, par ses allées et venues, un mouvement vibratoire: le

(*) Une disposition qui n'est pas indiquée sur la figure arrête alors les deux roues, et les empêche de continuer leur mouvement en vertu de la vitesse acquise.

son produit est d'autant plus aigu que le mouvement de rotation de la roue est plus rapide. — Ces détails suffiront pour faire comprendre

A

Fig. 507. — Roues dentées de Savart.

l'emploi des roues dentées dans la recherche expérimentale du nombre de vibrations d'un son; l'opération est conduite absolument comme avec la sirène.

647. **Compteurs graphiques. — Détermination du rapport des nombres de vibrations correspondants à deux sons déterminés.** — Les compteurs graphiques sont principalement destinés à fournir le rapport des nombres de vibrations exécutées dans le même temps par deux sons de hauteurs déterminées. L'idée première de la méthode est due à T. Young.

Parmi ces appareils, l'un des plus simples est le suivant. Un cylindre EF (*fig.* 508) dont la surface a été couverte de noir de fumée, est porté sur un axe DV dont l'extrémité supérieure V, travaillée en filet de vis, traverse un écrou pratiqué dans l'une des branches du support. Lorsqu'on fait tourner le cylindre au moyen de la manivelle M, il s'abaisse, à chaque tour, d'une quantité égale au pas de la vis. — La figure représente en

T une tige métallique, qui est assujettie solidement par l'une de ses extrémités B, et dont l'autre extrémité porte une pointe fine A; cette pointe

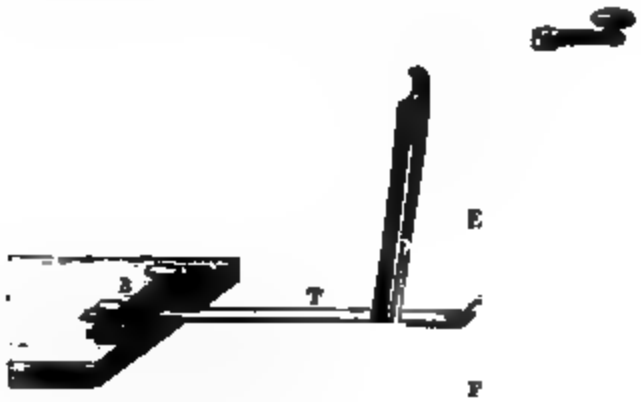


Fig. 506.

vient toucher légèrement la surface du cylindre. Si l'on faisait mouvoir le cylindre seul, la pointe, enlevant le noir de fumée, tracerait une hélice; si, en même temps, on fait vibrer la tige, au moyen d'un archet, l'hélice parait dentelée: chacune des sinuosités correspond à une vibration de la tige.

Or il est possible de disposer l'un au-dessous de l'autre deux corps sonores, de manière qu'ils inscrivent en même temps leurs vibrations sur la surface du cylindre; si l'on fait cette expérience sur deux corps qui soient à l'unisson, on trouve toujours, sur les courbes qu'ils ont tracées, le même nombre de sinuosités entre deux génératrices déterminées du cylindre. Si les deux corps donnent des sons de hauteurs différentes, le rapport des nombres de sinuosités comprises entre deux génératrices du cylindre donne le rapport des nombres de vibrations exécutées dans le même temps (*).

648. **Limite des sons perceptibles.** — On a admis pendant longtemps, d'après des expériences de Savart, que l'organe de l'ouïe ne peut percevoir des sons qui correspondent à moins de 16 vibrations ou à plus de 5000 vibrations par seconde.

(*) On peut remarquer que, si l'appareil était disposé de manière que la vitesse angulaire du cylindre fût connue, il suffirait de compter le nombre des sinuosités tracées par un corps sonore entre deux génératrices distantes sur le cylindre d'un angle connu, pour avoir le nombre absolu des vibrations exécutées en une seconde.

Il est maintenant démontré que ces limites dépendent du degré de sensibilité particulier à chaque oreille. Savart a reconnu lui-même qu'en augmentant l'intensité du son, il est possible de les reculer davantage. Despretz est parvenu à rendre perceptibles des sons qui correspondent à 56000 vibrations par seconde.

649. **Réflexion du son.** — Lorsqu'un son est produit à une certaine distance d'un obstacle fixe, d'un mur élevé par exemple, tout le monde sait que ce son *revient*, au bout d'un certain temps, comme s'il était émané d'un corps sonore placé de l'autre côté de l'obstacle. — Ce phénomène constitue la *réflexion du son.*

Les lois de la réflexion du son sont identiques à celles de la réflexion de la lumière, qui seront étudiées avec détail dans le livre suivant. Nous nous contenterons ici de vérifier cette identité par l'expérience suivante. — On place, en avant d'un miroir sphérique concave, la lumière d'une bougie, en un point qu'on appelle *foyer* du miroir: les rayons émis par la bougie sont réfléchis par le miroir dans une direction parallèle à son axe; on les reçoit sur un autre miroir sphérique, disposé à une distance de plusieurs mètres et regardant le premier: ce miroir les réfléchit à son tour, et les concentre en son foyer, de manière à éclairer un petit écran de papier situé en ce point. On remplace alors la bougie par une montre, et on met l'oreille au point où se trouvait l'écran : l'oreille perçoit alors très-distinctement les battements de la montre, qui deviennent au contraire absolument imperceptibles pour peu que l'on dérange l'oreille de cette position.

Un phénomène tout à fait analogue se produit dans une des salles du Conservatoire des arts et métiers, à Paris : un observateur placé à l'un des angles entend des paroles prononcées à voix basse à l'angle opposé, tandis qu'une personne placée au milieu ne peut les distinguer; c'est à la forme de la voûte qu'est dû ce phénomène.

650. **Échos et résonnances. — Porte-voix.** — Le phénomène des *échos* est dû à la réflexion du son. — Lorsqu'un rayon sonore frappe *normalement* un obstacle fixe, ce rayon se réfléchit *en revenant sur lui-même;* si donc on produit un son à une certaine distance d'un obstacle, tel qu'un mur élevé ou un rocher, sur une normale à la surface de cet obstacle, le mouvement reviendra à son point de départ et y produira la sensation d'un nouveau son.

Pour qu'il y ait un *écho* véritable, il faut qu'il s'écoule un temps suffisant entre les deux perceptions; en effet, l'expérience montre que l'oreille ne peut distinguer deux sons séparés par un intervalle de temps moindre que $\frac{1}{10}$ de seconde. Or le son parcourt dans l'air environ 34 mètres en $\frac{1}{10}$ de seconde; si donc l'observateur se trouve à une distance de l'obstacle inférieure à 17 mètres, le son direct et le son réfléchi se succéderont de trop près pour qu'il puisse les distinguer; il n'entendra qu'une *résonnance.* Au contraire, il y aura *écho*, c'est-à-dire

succession de deux sons nettement séparés, si la distance est supérieure à 17 mètres.

Dans les appartements de peu d'étendue, on ne peut entendre que des résonnances; une salle devrait avoir au moins 17 mètres de longueur. pour qu'un son émis à l'une des extrémités vînt faire écho, après avoir été réfléchi par le mur de l'autre extrémité; encore ne pourrait-on distinguer que des monosyllabes, ou la dernière syllabe des mots que l'on prononcerait : on aurait un *écho monosyllabique*. — Pour produire des *échos polysyllabiques*, il faut que le plan réflecteur soit assez éloigné pour que plusieurs syllabes puissent se reproduire après que la dernière a été prononcée. Il existe un écho semblable dans le parc de Woodstock, en Angleterre; il répète jusqu'à vingt syllabes.

On nomme *échos multiples* ceux qui reproduisent plusieurs fois le même son. On conçoit que deux murs parallèles, distants de plus de 34 mètres, puissent donner un écho multiple, pour un observateur placé vers le milieu de l'espace qui les sépare. On trouve un écho semblable à Simonetta, en Italie : il répète, dit-on, quarante fois.

Le porte-voix et le cornet acoustique sont encore des applications de la réflexion du son.

Le *porte-voix* consiste en un cône métallique, vers le sommet duquel est une embouchure : il présente à son autre extrémité une partie plus évasée que le reste du cône, à laquelle on donne le nom de *pavillon*. Si l'on produit un son à l'embouchure, les réflexions sur les parois internes du cône forcent les rayons sonores à faire des angles de plus en plus petits avec l'axe de l'instrument; à la sortie du pavillon, ces rayons divergent donc très-peu, en sorte que le son peut être porté à une grande distance, sans éprouver une diminution notable d'intensité.

Le *cornet acoustique*, dont se servent les personnes qui ont l'ouïe *dure*, est un porte-voix renversé, mais de petite dimension. On place le sommet du cône dans l'ouverture du conduit de l'oreille, et l'on dirige le pavillon vers la personne qui parle.

CHAPITRE II

INTERVALLES MUSICAUX. — THÉORIE DE LA GAMME ET DES ACCORDS

---

651. **Intervalles musicaux.** — On appelle, en Acoustique, *intervalle de deux sons, le rapport des nombres de vibrations qui leur correspondent pendant des temps égaux.* Si l'on considère, par exemple, deux sons qui correspondent, l'un à 900 vibrations par seconde, l'autre à 600, l'intervalle de ces deux sons est $\frac{3}{2}$.

Lorsque deux sons exécutent le même nombre de vibrations dans le même temps, on dit qu'ils sont à l'*unisson*.

Lorsqu'un son correspond à un nombre de vibrations *double* du nombre de vibrations d'un autre son, il est dit à l'*octave aiguë* de ce dernier. L'intervalle d'octave est donc caractérisé par le rapport 2.

Lorsqu'on produit simultanément deux sons différents, il peut en résulter pour l'oreille, soit une sensation agréable, soit une sensation désagréable : dans le premier cas, on dit qu'il y a accord ou *consonnance*; dans le second, *dissonance*. — Si l'on détermine, sous forme de fraction irréductible, la valeur numérique de l'intervalle des deux sons, on remarque en général que les deux termes de la fraction sont d'autant plus petits que la consonnance est plus agréable. Ainsi la production de deux sons dont l'intervalle est $\frac{3}{2}$ ou $\frac{5}{4}$ (*quinte* ou *tierce*) constitue une consonnance agréable ; tandis que la production simultanée de deux sons présentant un intervalle de $\frac{9}{8}$ ou de $\frac{16}{15}$ (*ton* ou *demi-ton*), constitue une dissonance.

652. **Gamme.** — La gamme est une succession de huit sons ou *notes*, constituant une série dont les deux extrêmes sont formés par un son quelconque et par son octave.

Il y a évidemment une infinité de manières d'intercaler, entre un son donné et son octave, un même nombre de sons intermédiaires, en faisant varier les intervalles que ces sons intermédiaires offrent entre eux : la gamme moderne réalise cette intercalation de manière à satisfaire, par la combinaison de ses différentes notes, aux besoins de l'harmonie. Les notes dont elle se compose se distinguent par les noms : *ut*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*. Ces noms suffisent, comme nous allons le montrer, pour toutes les exigences de la notation musicale.

Si l'on détermine, au moyen de la sirène, par exemple, les nombres de vibrations qui correspondent aux différents sons de la gamme, et si on les divise par le nombre de vibrations de *ut*, on trouve les quotients qui suivent :

ut	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	ut_2.
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2.

Ces quotients offrent entre eux les mêmes rapports que les nombres *absolus* des vibrations des diverses notes ; on peut donc s'en servir pour trouver les valeurs des intervalles de ces notes entre elles.

Et d'abord, en divisant chaque fraction par celle qui la précède, on obtient la série des intervalles offerts par deux notes consécutives, intervalles qui n'ont pas tous la même valeur, et qui ont reçu des noms particuliers, comme l'indique le tableau suivant :

ut-ré. . . . . $\frac{9}{8} : 1 = \frac{9}{8}$ . . . . . *ton majeur*.

ré-mi. . . . . $\frac{5}{4} : \frac{9}{8} = \frac{10}{9}$ . . . . . *ton mineur*.

mi-fa. . . . . $\frac{4}{3} : \frac{5}{4} = \frac{16}{15}$ . . . . . *demi-ton majeur*

fa-sol . . . . . $\frac{3}{2} : \frac{4}{3} = \frac{9}{8}$ . . . . . *ton majeur*.

sol-la. . . . . $\frac{5}{3} : \frac{3}{2} = \frac{10}{9}$ . . . . . *ton mineur*.

la-si. . . . . $\frac{15}{8} : \frac{5}{3} = \frac{9}{8}$ . . . . . *ton majeur*.

si-ut. . . . . $2 : \frac{15}{8} = \frac{16}{15}$ . . . . . *demi-ton majeur*.

Représentons le ton majeur par T ; le ton mineur par T′ et le demi-ton majeur par t : nous pourrons représenter alors la succession des intervalles des notes consécutives de la gamme comme il suit :

(1) T T′ t T T′ T t.

On peut aussi calculer les intervalles de deux sons quelconques de la gamme : par exemple, les intervalles qui existent entre *ut* et chacune des

autres notes. Ces intervalles ont reçu en musique des noms particuliers, savoir :

ut-ré..... $\frac{9}{8}$ .... *ton majeur*.

ut-mi..... $\frac{5}{4}$ .... *tierce majeure*.

ut-fa..... $\frac{4}{3}$ .... *quarte*.

ut-sol..... $\frac{3}{2}$ .... *quinte*.

ut-la..... $\frac{5}{3}$ .... *sixte*.

ut-si..... $\frac{15}{8}$ .... *septième*.

653. **Accord parfait majeur.** — Les consonnances *ut-mi* et *ut-sol* sont particulièrement agréables à l'oreille; mais en faisant raisonner ensemble les trois notes *ut-mi-sol*, on obtient un accord dont l'harmonie est si remarquable qu'on l'a désigné sous le nom d'*accord parfait majeur*. — Il est formé par la succession d'une *tierce majeure* et d'une *tierce mineure*, savoir :

	ut	*mi*	*sol*
Nombres de vibrations...	1	$\frac{5}{4}$	$\frac{3}{2}$
Intervalles		$\frac{5}{4}$	$\frac{3}{2} : \frac{5}{4} = \frac{6}{5}$
		(*Tierce majeure.*)	(*Tierce mineure.*)

On appelle *tonique* la note la plus grave de l'accord, et *dominante* la note la plus aiguë (*).

(*) La gamme tout entière peut être considérée comme dérivant de l'accord parfait ; nous allons montrer en effet que, si l'on prend comme point de départ la note *ut*, une succession de trois accords parfaits permet de retrouver toutes les notes de la gamme, avec les nombres de vibrations indiqués plus haut.

Et d'abord l'accord parfait qui a pour tonique *ut* fournit déjà les trois notes *ut*, *mi*, *sol*, dont les nombres de vibrations sont 1, $\frac{5}{4}$, $\frac{3}{2}$.

Si maintenant on forme un accord parfait dont la tonique soit la dominante du précédent, c'est-à-dire la note *sol*, on obtient, comme nombre de vibrations de la seconde note de cet accord, $\frac{3}{2} \times \frac{5}{4} = \frac{15}{8}$; c'est la note *si*. Quant à la troisième note de ce même accord, elle aura comme nombre de vibrations $\frac{3}{2} \times \frac{3}{2} = \frac{9}{4}$; il suffit d'en prendre la moitié, c'est-à-dire l'octave grave, pour obtenir le nombre $\frac{9}{8}$, qui correspond au *ré* de la gamme.

Enfin, si l'on forme un accord parfait dont la dominante soit la tonique du premier, c'est-à-dire la note *ut*, on aura, pour la tonique de cet accord, le nombre de vibrations

654. Dièzes. — L'échelle musicale, limitée aux notes de la gamme reproduites successivement d'octaves en octaves, serait d'un usage assez restreint.

L'exemple le plus simple que l'on puisse donner de la nécessité d'un plus grand nombre de sons est celui qui se présente lorsqu'on veut *transposer* la gamme, c'est-à-dire en reproduire la mélodie en prenant pour tonique une note autre que *ut*. Cherchons à y parvenir en partant de la dominante *sol* : pour cela, écrivons d'abord les notes de la gamme dans leur ordre habituel, en commençant par *sol*, et indiquons par les notations précédemment employées les intervalles compris entre deux notes consécutives :

	Notes.	*sol*	*la*	*si*	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*
(2)	*Intervalles*	T	T	*t*	T	T	*t*	T	

Cette série diffère de la série (1), qui a été donnée plus haut comme caractérisant la succession des intervalles de la gamme, par ses premier, deuxième, sixième et septième termes : toutefois, avant de corriger la série (2) pour en faire une gamme exacte, il convient de remarquer que la sensibilité de notre organe n'est point indéfinie, et que, par exemple, le rapport des deux intervalles T et T', savoir $\frac{9}{8} : \frac{10}{9}$, ou $\frac{81}{80}$, est assez peu différent de l'unité pour qu'on puisse toujours, dans une mélodie, substituer un ton majeur à un ton mineur, ou réciproquement : cet intervalle est celui qu'on désigne sous le nom de *comma*. — En particulier, dans la gamme de *sol*, il sera permis de conserver à toutes les notes, jusqu'à la note *mi* inclusivement, les valeurs relatives qu'elles ont dans la gamme de *ut*. Mais l'intervalle *mi-fa* n'étant que d'un demi-ton, au lieu d'être d'un ton comme l'exige la série (1), il faut hausser la note *fa* pour rétablir la mélodie; c'est ce qu'on fait en multipliant l'intervalle *mi-fa* par $\frac{25}{24}$, ce qui donne $\frac{16}{15} \times \frac{25}{24}$ ou $\frac{10}{9}$, c'est-à-dire un ton mineur, lequel peut être substitué, comme il vient d'être dit, au ton majeur. La note qui remplace *fa* prend le nom de *fa dièze*, et s'indique par *fa* ♯. L'intervalle de *fa* à *fa* ♯, savoir $\frac{25}{24}$, s'appelle demi-ton mineur. — Quant à l'intervalle de

1 divisé par $\frac{3}{2}$, c'est à-dire $\frac{2}{3}$, et il suffit d'en prendre le double, c'est-à-dire l'octave aiguë pour obtenir, le nombre $\frac{4}{3}$ qui correspond au *fa* de la gamme. Enfin, on aura, pour la seconde note de ce même accord, le nombre $\frac{2}{3} \times \frac{5}{4} = \frac{5}{6}$, dont il suffit encore de prendre l'octave aiguë pour obtenir le nombre $\frac{5}{3}$, qui correspond au *la* de la gamme. — On aura donc définitivement ainsi toutes les notes de la gamme naturelle.

fa ♯ à *sol*, il est alors $\frac{27}{25}$: il n'a pas exactement la valeur du demi-ton majeur $\frac{16}{15}$, mais il est au demi-ton majeur dans le rapport $\frac{81}{80}$, c'est-à-dire qu'il peut être considéré comme équivalent pour l'oreille.

En définitive, la gamme de *sol* est alors composée comme il suit :

sol *la* *si* *ut* *ré* *mi* *fa* ♯ *sol*;

toutes les notes, à l'exception de celle qui précède immédiatement l'octave de la tonique, et qu'on nomme la *note sensible*, ont les mêmes valeurs numériques que dans la gamme de *ut*; la note sensible seule a été *diézée*, c'est-à-dire multipliée par $\frac{25}{24}$, ou haussée d'un demi-ton mineur.

Ce résultat peut se généraliser de la manière suivante :

Pour passer d'une gamme quelconque à celle qui aurait pour tonique la dominante de la première, il suffit de reproduire, dans leur ordre naturel, toutes les notes de celle-ci, en diézant seulement la note sensible de la nouvelle gamme.

Appliquons cette règle à la gamme de *sol* que nous venons d'établir. La dominante est *ré*; en la prenant pour tonique, la gamme de *ré* sera :

ré *mi* *fa* ♯ *sol* *la* *si* *ut* ♯ *ré*.

En continuant ainsi, on arrivera à introduire sept notes *diézées*, placées chacune à un demi-ton au-dessus des notes de la gamme d'*ut*.

655. **Bémols.** — L'usage de *bémols*, placés à un demi-ton au-dessous des notes de la gamme d'*ut*, s'introduit par des considérations semblables à celles qui viennent de nous fournir les *dièzes*. — Si, par exemple, on veut reproduire la gamme en partant de la note *fa*, ou *sous-dominante* d'*ut*, on reconnaît facilement que la série

fa *sol* *la* *si* *ut* *ré* *mi* *fa*

ne devient une gamme exacte qu'à la condition de diminuer dans un rapport convenable l'intervalle *la-si*, et d'augmenter en même temps l'intervalle *si-ut*; c'est ce qu'on fait en baissant la note *si* d'un demi-ton, c'est-à-dire en la remplaçant par une nouvelle note, appelée *si bémol*, et telle que l'intervalle de *si bémol* à *si* soit égal à $\frac{25}{24}$. On la désigne par la notation *si* ♭; la gamme de *fa* se compose donc, en définitive, des notes suivantes :

fa *sol* *la* *si* ♭ *ut* *ré* *mi* *fa*

Pour passer d'une gamme à celle qui aurait pour tonique la sous-dominante de la première, il suffit de conserver à toutes les notes de celle-ci leurs

valeurs respectives, en ayant soin seulement de bémoliser la sous-dominante de la nouvelle gamme.

En partant de la gamme de *fa*, on aura la gamme de *si* ♭, savoir :

si ♭ *ut ré mi* ♭ *fa sol la si* ♭ ;

et ainsi de suite.

* 656. **Gamme mineure.** — Les gammes que nous venons d'étudier portent en musique le nom de *gammes majeures;* dans chacune d'elles, la tonique et la troisième note sont séparées par un intervalle de tierce majeure, qui se décompose en deux tons entiers, l'un majeur et l'autre mineur.

Mais on fait souvent usage aussi d'autres gammes, qui sont formées des mêmes notes que les précédentes, et qu'on nomme *gammes mineures*, parce que l'intervalle de la tonique à la troisième note ne comprend qu'une tierce mineure.

A chaque gamme majeure, correspond une gamme mineure, composée des mêmes notes qu'elle. A la gamme majeure de *ut* répond la gamme mineure de *la*, savoir :

la si ut ré mi fa sol la.

Cette gamme mineure est définie par la succession suivante d'intervalles :

T *t* T T' *t* T T'.

On dit que la gamme majeure de *ut* est la *majeure relative* de la gamme mineure de *la*.

En général, *la tonique de la* majeure relative *d'une gamme mineure quelconque est la note qui est placée à une tierce mineure au-dessous de la tonique de celle-ci.*

Lorsqu'on veut, par exemple, former la gamme mineure de *si*, il suffit alors de chercher la tonique de la majeure relative, c'est-à-dire la tierce mineure de *si*; on trouve *ré*. Or, d'après ce qu'on a vu plus haut, la gamme majeure de *ré* est composée des notes

ré mi fa ♯ *sol la si ut* ♯ *ré,*

donc la gamme mineure de *si* sera :

si ut ♯ *ré mi fa* ♯ *sol la si.*

657. **Accord parfait mineur.** — L'*accord parfait mineur* est produit par la consonnance des première, troisième et cinquième notes de la gamme mineure. Ainsi, l'accord parfait mineur de *la* est :

la ut mi;

les valeurs relatives des notes qui le composent sont :

	la	*ut*	*mi*
Nombres de vibrations...	$\frac{5}{3}$	2	$\frac{5}{2}$
Intervalles.....	$\frac{6}{5}$ (*Tierce mineure.*)	$\frac{5}{4}$ (*Tierce majeure.*)	

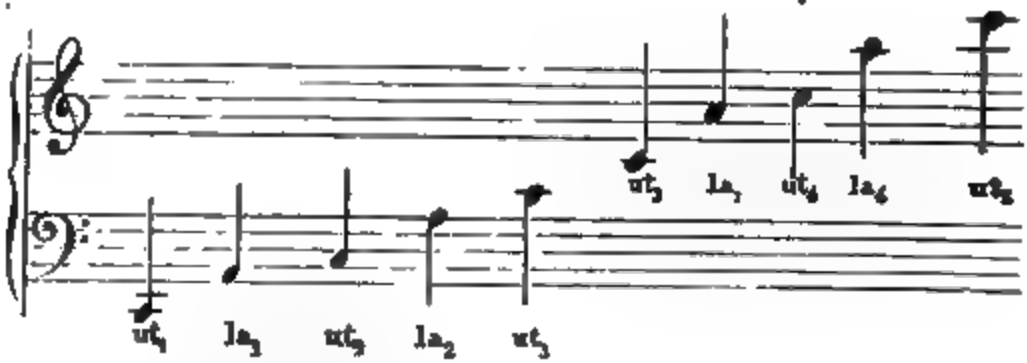
On voit que l'intervalle de *la* à *mi*, égal à $\frac{3}{2}$, est une quinte, comme dans l'accord parfait majeur, mais cette quinte est partagée en deux intervalles, *la-ut* et *ut-mi*, c'est-à-dire en une tierce mineure et une tierce majeure, disposées dans un ordre inverse de celui qui caractérisait l'accord parfait majeur.

* 658. **Gamme tempérée.** — On voit, par ce qui précède, que l'échelle complète d'une octave se compose maintenant de 21 sons différents, savoir les sept notes de la gamme de *ut*, leurs dièzes et leurs bémols. Si l'on voulait réaliser, dans plusieurs octaves successives, toutes ces notes sur des instruments à sons fixes, tels que l'orgue ou le piano, on compliquerait à la fois la construction et le jeu de l'instrument. Cette circonstance a conduit les musiciens à l'idée du *tempérament*. — Ils ont divisé l'intervalle d'octave en 12 demi-tons *moyens*, égaux chacun à $\sqrt[12]{2}$, et destinés à remplacer indistinctement les demi-tons majeurs et les demi-tons mineurs; les tons entiers majeurs et mineurs sont alors remplacés eux-mêmes par un intervalle décomposable en deux demi-tons moyens.

Pour justifier l'adoption de cette échelle, il suffit de montrer que les deux intervalles les plus importants, la tierce et la quinte, ont sensiblement la même valeur dans la gamme naturelle et dans la gamme tempérée:

	GAMME NATURELLE.	GAMME TEMPÉRÉE.
Tierce.	$\frac{5}{4} = 1{,}250$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^4 = 1{,}260$
Quinte.	$\frac{3}{2} = 1{,}500$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^7 = 1{,}498$

659. **Nombre absolu de vibrations des divers sons de l'échelle musicale.** — Jusqu'ici nous n'avons considéré que les *rapports* des nombres de vibrations des divers sons de l'échelle musicale; dans la pratique, il importe d'indiquer, pour chacune d'elles, le nombre *absolu* de vibrations qui lui correspond. — L'*ut* le plus grave du violoncelle répond à 65,25 vibrations par seconde; en acoustique, on le désigne par ut_1, et l'on affecte du même indice toutes les notes comprises entre ut_1 et son octave aiguë ut_2; dans l'octave suivante, les notes se distinguent par l'indice 2; dans la troisième, par l'indice 3, etc. Au-dessous de ut_1, on

emploie, d'octave en octave, les indices — 1, — 2, etc. Le tableau suivant résume la corrélation des notations musicale et acoustique.

Pour accorder les instruments, on se sert ordinairement d'un ***diapason*** ou fourchette d'acier (*fig.* 528), qui rend un son déterminé de l'échelle quand on le met en vibration. — Le diapason normal donne la note la_2, dont on a récemment fixé la valeur à 435 vibrations par seconde (*).

* 660. **Étude optique des intervalles musicaux ; expériences de M. Lissajous.** — On doit à M. Lissajous des expériences qui permettent de caractériser les intervalles musicaux sans le concours de l'oreille. Nous exposerons d'abord le principe de sa méthode.

Dans l'intérieur d'une chambre obscure, par une ouverture très-étroite pratiquée au volet, on fait pénétrer un faisceau de rayons solaires.

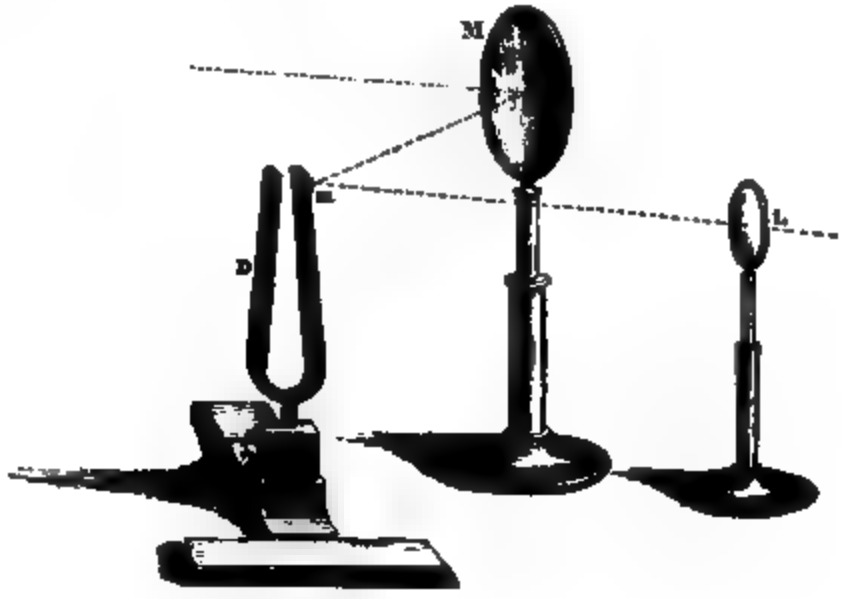


Fig. 509.

Ce faisceau vient rencontrer un petit miroir métallique *m* (*fig.* 509), fixé à une des branches du diapason vertical D ; il est renvoyé par réflexion sur

(*) Ces vibrations sont des *vibrations doubles*, formées chacune d'une allée et d'une venue du corps sonore, ainsi qu'il a été indiqué plus haut (633). Les auteurs qui entendent par le mot de vibrations des *vibrations simples*, formées chacune d'une allée ou d'une venue, donnent alors à la note *la* un nombre de vibrations égal à 870 par seconde.

un miroir auxiliaire M, qui le réfléchit à son tour sur l'écran E. Au moyen d'une lentille L, convenablement placée, on amène ces rayons à former sur l'écran une image très-petite et très-brillante. Pour simplifier le langage, nous supposerons cette image réduite à un point, et le faisceau lumineux à un seul rayon.

Lorsqu'on fait vibrer le diapason à l'aide d'un archet, le miroir *m* exécute une série d'oscillations, dont l'effet est de faire osciller le rayon réfléchi dans le plan primitif d'incidence, et par suite d'imprimer au point lumineux I un mouvement de va-et-vient sur l'écran, suivant une ligne droite verticale I'I". On aperçoit alors, non pas un point lumineux se déplaçant sur la ligne I'I", mais la ligne elle-même éclairée tout entière. Cet effet résulte de ce que les impressions produites sur notre œil, à un moment déterminé, persistent pendant un temps appréciable : chaque vibration du diapason ayant une durée beaucoup moindre que l'impression produite par le point lumineux dans chacune de ses positions, l'œil l'aperçoit à la fois dans toutes ces positions successives,

L'illusion est tout autre quand on imprime au miroir auxiliaire M une rotation autour de son axe vertical : l'image est alors animée de deux mouvements simultanés, savoir un mouvement vibratoire vertical, et un mouvement de translation horizontal ; ces deux mouvements se composent en un seul, d'où résulte une ligne sinueuse, telle que *i'i"*, dont chaque sinuosité répond à une vibration du diapason.

Enlevons maintenant le miroir auxiliaire M et mettons à la même place un deuxième diapason D' (*fig.* 510), installé de manière à vibrer dans un plan horizontal, et portant, comme le premier, un petit miroir métallique *m'* sur l'une de ses branches. — Supposons d'abord que les deux diapasons soient rigoureusement à l'*unisson*. Soit I (*fig.* 511) la trace du rayon lumineux sur l'écran lorsque les deux instruments sont immobiles ; I'I" la droite verticale qu'elle décrirait si le diapason D vibrait seul, et H'H la droite horizontale lumineuse qu'on obtiendrait en faisant vibrer le diapason D' seul. Admettons, pour plus de simplicité, que les amplitudes de vibrations des deux diapasons soient égales ; I'I" et H'H auront la même longueur. Admettons encore que les deux mouvements commencent en même temps, ou, comme on dit, qu'il n'y ait entre eux aucune *différence de phase* ; le point lumineux aura, à un instant quelconque, des vitesses égales parallèlement à I'I" et parallèlement à H'H. Dès lors, on voit que le mouvement résultant s'effectuera suivant la diagonale AB du carré dont I', H', I", H sont les milieux des côtés.

Si, au contraire, le mouvement horizontal commence lorsque le point lumineux a déjà parcouru une portion de sa trajectoire verticale, c'est-à-dire quand le diapason vertical a déjà accompli une partie de sa vibration, la trajectoire résultante change ; selon que la *différence de phase* des deux mouvements est égale à $\frac{1}{8}, \frac{2}{8}, \frac{3}{8}, \frac{4}{8} \cdots \frac{8}{8}$ de vibration, le calcul

montre que la courbe lumineuse obtenue sur l'écran doit être une ellipse dont le grand axe est dirigé suivant AB, un cercle inscrit dans le carré

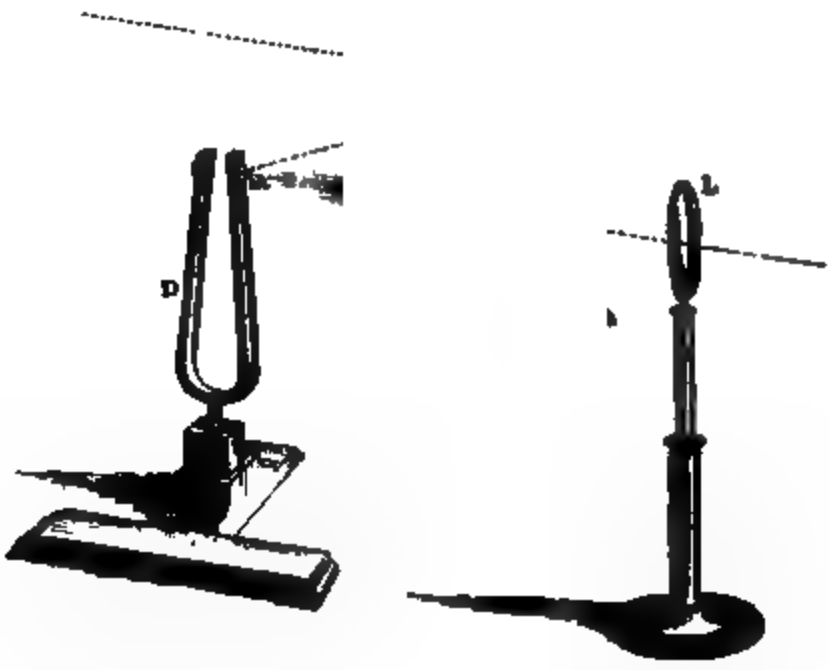


Fig. 510.

ABCD, une ellipse ayant CD pour grand axe, la diagonale CD elle-même, etc..., enfin la diagonale primitive AB. — Si les amplitudes de vibrations des deux diapasons sont différentes, ce qui est le cas le plus ordinaire, les résultats ne diffèrent que très-peu des précédents ; le carré ABCD devient un rectangle, et le cercle correspondant à une différence de phase de $\frac{2}{8}$ ou de $\frac{6}{8}$ de vibration se change en une ellipse ayant ses axes dirigés suivant l'l'' et H'H. On a alors, pour les différences de phase considérées, les figures optiques représentées dans la première série du tableau ci-contre (page 571).

Fig. 511.

Nous venons de supposer l'unisson *rigoureusement* établi entre les deux diapasons : dans ce cas, à peu près impossible à réaliser, la différence de phase primitive se maintient aussi longtemps que durent les vibrations. La figure optique reste donc invariable de forme, et ne fait

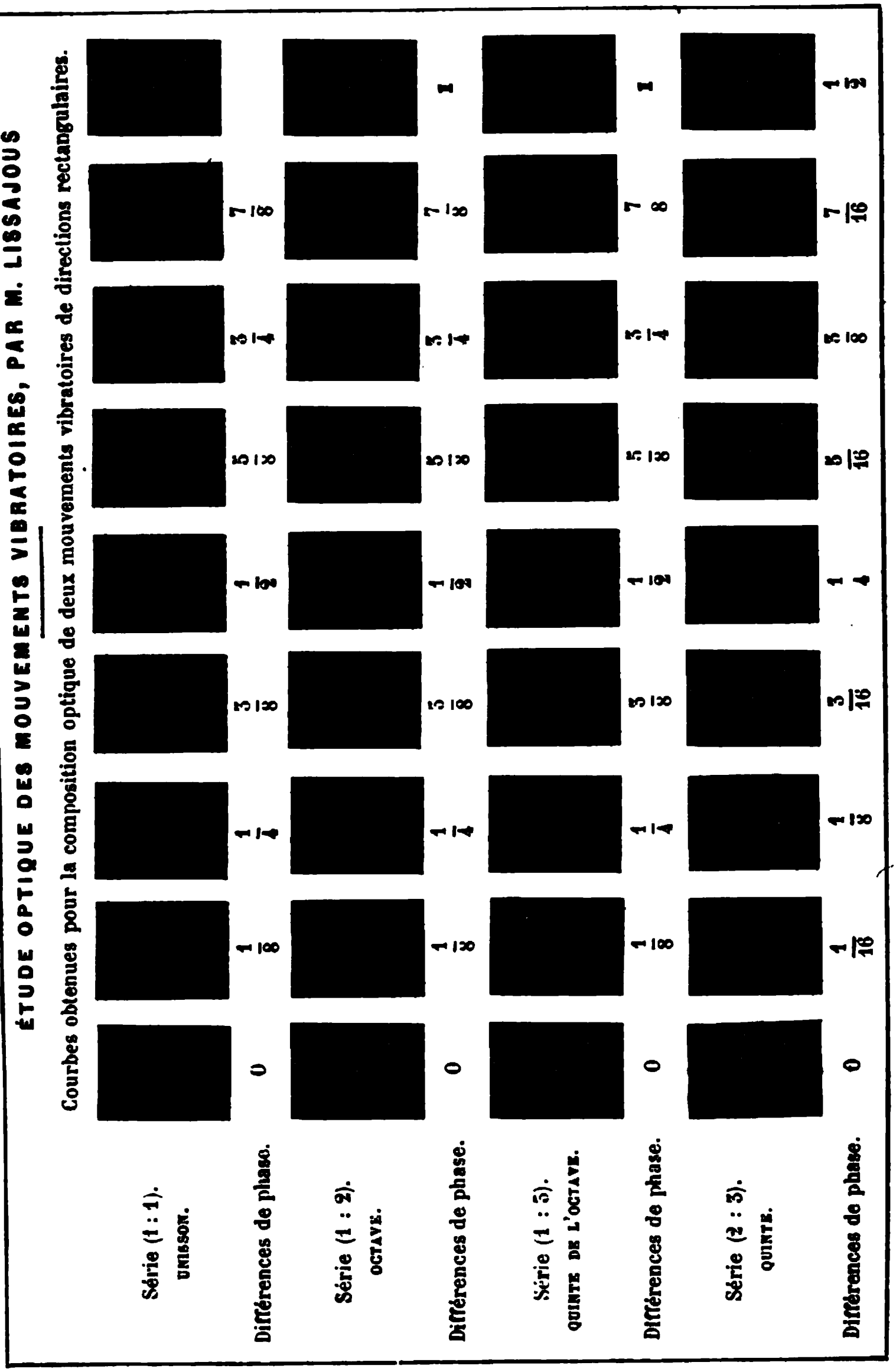

ÉTUDE OPTIQUE DES MOUVEMENTS VIBRATOIRES, PAR M. LISSAJOUS
Courbes obtenues pour la composition optique de deux mouvements vibratoires de directions rectangulaires.
Série (1 : 1). UNISSON.
Différences de phase.
Série (1 : 2). OCTAVE.
Différences de phase.
Série (1 : 3). QUINTE DE L'OCTAVE.
Différences de phase.
Série (2 : 3). QUINTE.
Différences de phase.
0
1/8
1/4
3/16
5/16
3/8
7/16
1/2
5/8
3/4
7/8
1

Fig. 512.

que diminuer de grandeur, à mesure que les amplitudes des vibrations décroissent. — Mais quand l'unisson est établi pour l'oreille, il y a en général encore une différence très-petite entre les durées des vibrations. Si les deux mouvements ont commencé en même temps, c'est-à-dire si la différence de phase initiale est nulle, il arrivera, au bout d'un certain nombre de vibrations du diapason horizontal, que le diapason vertical se trouvera par exemple en retard sur lui, de $\frac{1}{8}$ de vibration. La figure optique, qui était d'abord la diagonale AB du rectangle, se sera donc changée en l'ellipse inclinée n° 2. Au bout d'un temps égal à celui qui vient de s'écouler, on aura l'ellipse n° 3, et ainsi de suite. On voit donc que, si l'unisson n'est qu'approximatif, au lieu d'obtenir l'une ou l'autre des figures de la première série, on les aura *toutes successivement*, et quand l'un des diapasons aura gagné sur l'autre une vibration entière, la figure optique primitive se reproduira. Réciproquement, on voit que l'unisson sera d'autant plus exactement réalisé que la figure primitive mettra un temps plus long à reparaître sur l'écran. — Il est facile de concevoir qu'on puisse déduire de là une méthode permettant de comparer les divers diapasons à un même diapason normal.

En remplaçant le diapason D′ par un autre qui donne l'*octave* du premier, on obtient les courbes de la deuxième série. — Si l'accord d'octave est rigoureusement établi, la courbe conserve sa forme et ne fait que diminuer de grandeur. Cette forme, ainsi que l'indiquent les figures, varie d'ailleurs avec la différence initiale de phase des deux sons. — Si l'octave n'est qu'approchée, la courbe primitive se transforme sans cesse, et d'autant plus rapidement que le rapport des nombres de vibrations est plus différent de 2.

Si le diapason horizontal donne la quinte de l'octave du diapason vertical, c'est-à-dire s'il exécute trois vibrations quand celui-ci n'en fait qu'une seule, on a les courbes de la 3° série. — Enfin, la 4° série répond à l'accord de quinte (*).

En résumé, à chaque intervalle entre les deux sons, répond une figure optique déterminée. La forme de cette figure demeure invariable si l'intervalle est rigoureusement établi ; elle se modifie, en repassant périodiquement par sa forme primitive, si cet intervalle est légèrement altéré.

(*) A la simple inspection de la courbe obtenue, il est facile de trouver la valeur de l'intervalle des deux sons. — Si, en effet le diapason horizontal exécute quatre vibrations pendant que le diapason vertical n'en fait que trois, la courbe optique devra venir quatre fois en contact avec le côté AC du rectangle, tandis qu'elle ne touchera que trois fois le côté AD. On n'aura donc, pour obtenir la fraction qui mesure l'intervalle des deux sons, qu'à prendre pour numérateur le nombre des points où la tangente à la courbe est verticale, et pour dénominateur le nombre des points où elle est horizontale. Pour effectuer cette détermination, il faut opérer sur une courbe qui ne présente aucun point d'arrêt, par exemple sur une des courbes n° 4 ou n° 8, et non sur les courbes n°° 1, 4, 5, etc.

CHAPITRE III

VIBRATIONS DES GAZ. — TUYAUX SONORES

661. **Les sons rendus par les tuyaux sonores sont dus aux vibrations du gaz intérieur.** — Les tuyaux sonores, tels que ceux dont on fait usage dans les jeux d'orgue, sont tantôt cylindriques et tantôt prismatiques ; leurs parois sont de bois ou de métal. Pour les *faire parler*, on y adapte une embouchure de forme particulière, qui se monte elle-même sur un réservoir d'air comprimé, ou *sommier*.

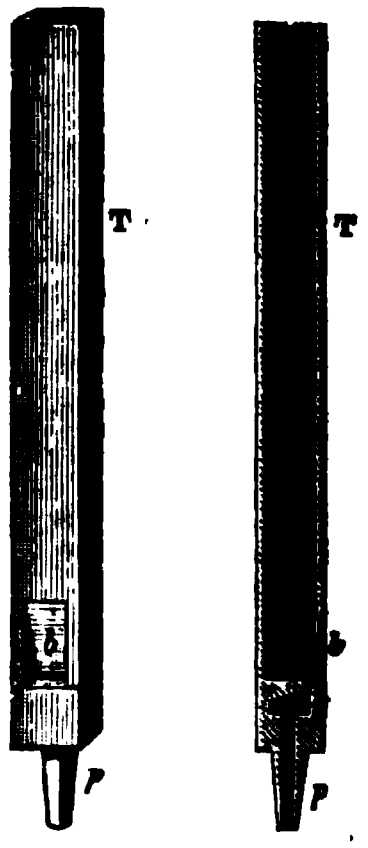


Fig. 513. Fig. 514.

Dans les *tuyaux à bouche*, qui sont le plus ordinairement employés, le vent arrive par le *pied p* (*fig.* 513 et 514), traverse la fente étroite *l* qu'on nomme la *lumière*, et vient se briser contre le biseau *b* qui constitue la *lèvre supérieure* de la bouche. Une partie de cet air pénètre dans le tuyau et détermine, dans la colonne d'air intérieure, des vibrations qui donnent naissance à un son.

L'expérience montre que les petites vibrations des parois du tuyau, au moins lorsque ces parois sont suffisamment épaisses, ne modifient pas la hauteur du son et n'ont guère d'autre influence que de lui donner un *timbre* ou un autre, selon qu'elles sont en métal ou en bois (*).

Au contraire, l'air intérieur est animé d'un mouvement vibratoire qu'on peut rendre sensible de la manière suivante. — On dispose, sur une

(*) Lorsque les parois d'un tuyau ont une faible épaisseur, elles peuvent participer aux vibrations de la colonne d'air et influer sur ces vibrations, de manière à modifier la *hauteur* du son produit. — Pour en faire l'expérience, on monte sur la soufflerie deux tuyaux dont les dimensions intérieures sont exactement égales, mais dont l'un a des parois épaisses de bois ou de métal, et l'autre des parois membraneuses, de

soufflerie (*fig.* 515), un tuyau T (*fig.* 516) ouvert à la partie supérieure et dont l'une des faces est en verre. La soufflerie se compose d'un soufflet S, muni d'une pédale P, qui comprime l'air dans la caisse ou *sommier*

Fig. 515. Fig. 516.

AB. La face supérieure de cette caisse est percée d'un certain nombre de trous, qu'on peut ouvrir à volonté en pressant sur les touches *t*, *t*, *t*...— Le tuyau T étant assujetti dans l'une de ces ouvertures, si on le fait parler et qu'on introduise, à l'aide d'un fil de soie, une membrane de baudruche, tendue sur un anneau rigide S et couverte de sable fin, on voit le sable s'agiter vivement dans toutes les parties de la colonne d'air,

papier par exemple. Le son du deuxième tuyau est toujours plus faible que celui du premier; il est d'ailleurs un peu plus grave, et peut même s'abaisser de près d'une octave lorsqu'on vient à mouiller les parois (Savart).

Dans tout ce qui va suivre, nous supposerons les expériences faites avec des tuyaux à parois suffisamment résistantes, pour qu'on n'ait à considérer que les vibrations de l'air intérieur.

sauf en certains points que nous apprendrons bientôt à connaître. Cette colonne est donc le siége d'un mouvement vibratoire.

Nous distinguerons, dès à présent, les tuyaux sonores en *tuyaux ouverts* et *tuyaux fermés*, selon que l'extrémité opposée à la bouche est ouverte, ou fermée par une paroi solide.

662. **Lois des longueurs.** — Nous verrons bientôt qu'on peut faire rendre à un même tuyau une série de sons, de plus en plus élevés, à mesure qu'on rend plus rapide le courant d'air fourni par la soufflerie : de tous ces sons, le plus grave, qu'on nomme le son fondamental, se produit plus aisément que tous les autres, lorsque les dimensions transversales du tuyau ne sont pas trop petites par rapport à sa longueur.

1° *Pour des tuyaux de même espèce, les nombres de vibrations qui correspondent au son fondamental varient en raison inverse des longueurs de ces tuyaux.* — Pour établir cette loi, on dispose sur la soufflerie quatre tuyaux, tous ouverts ou tous fermés, dont les longueurs soient entre elles comme les nombres $1, \frac{4}{5}, \frac{2}{3}$; on constate que ces tuyaux donnent les notes de l'accord parfait, dont les nombres de vibrations sont entre eux comme $1, \frac{5}{4}, \frac{3}{2}$.

2° *Le son fondamental d'un tuyau fermé est l'octave grave de celui d'un tuyau ouvert de même longueur.* — On le démontre en adaptant sur la soufflerie un tuyau ouvert qui donne, par exemple, la note la_3 : si l'on ferme l'ouverture supérieure au moyen d'une paroi solide, le son se transforme en son octave grave la_2.

Il résulte de ces deux lois qu'*un tuyau fermé donne le même son fondamental qu'un tuyau ouvert de longueur double.* — C'est ce qu'on vérifie à l'aide d'un tuyau T (*fig.* 517), traversé en son milieu par une coulisse AS, mi-partie pleine et mi-partie évidée. En poussant cette coulisse dans un sens ou dans l'autre, on obtient à volonté un tuyau fermé, ou un tuyau ouvert de longueur double, sans que le son soit changé (*).

663. **Lois des harmoniques.** — Un même tuyau sonore, ouvert ou fermé, peut rendre une série de sons différents, qu'on nomme ses *harmoniques*.

Pour produire ces divers sons, on adapte, sur l'une des ouvertures de la soufflerie, un tuyau étroit T (*fig.* 518) dont le pied est muni d'un robinet R : on ouvre ensuite la soupape correspondante, et l'on règle l'arrivée de l'air de

Fig. 517.

(*) Ce résultat explique la substitution qu'on fait quelquefois, dans les orgues, du *bourdon*, ou tuyau fermé de 5 mètres de longueur environ, au tuyau ouvert de 10 mètres.

manière à obtenir un courant d'air de plus en plus rapide, en ouvrant graduellement le robinet, et en exerçant avec la main des pressions croissantes sur le soufflet par l'intermédiaire de la tige IC (*fig.* 515). On entend alors d'abord le son fondamental, puis une série de sons de plus en plus élevés.

Fig. 518.

1° Pour un *tuyau fermé*, si le son fondamental est ut_1, l'expérience montre que la série des harmoniques est formée des notes suivantes :

$$ut_1, \quad sol_2, \quad mi_3, \quad — \quad ré_4, \quad \text{etc.}$$

dont les nombres de vibrations se représentent par

1 3 5 7 9 etc.

2° Pour un *tuyau ouvert*, si le son fondamental est encore ut_1, l'expérience montre que la série des harmoniques se compose de

$$ut_1 \quad ut_2 \quad sol_2 \quad ut_3 \quad mi_3 \quad sol_3 \quad — \quad ut_4 \quad ré_4 \quad \text{etc.}$$

dont les nombres de vibrations peuvent être représentés respectivement par

1 2 3 4 5 6 7 8 9 etc.

De quelque manière qu'on opère d'ailleurs pour faire parler un tuyau ouvert ou fermé, on n'en peut jamais tirer d'autres sons que ceux que nous venons de définir. — *Un même tuyau est donc capable de rendre une série de sons différents, mais il ne donne pas indistinctement tous les sons de l'échelle musicale.*

On conclut de ces expériences :

1° *Que les nombres de vibrations des harmoniques d'un même* tuyau fermé *varient comme les nombres impairs de la suite naturelle;*

2° *Que les nombres de vibrations qui correspondent aux harmoniques d'un même* tuyau ouvert *varient comme les nombres entiers de la suite naturelle.*

664. **Production des nœuds fixes et des ventres fixes dans les tuyaux fermés.** — Si l'on assimile le mouvement vibratoire produit par l'arrivée de l'air dans un tuyau au mouvement que produisent les vibrations d'une lame ou d'un piston mobile (639), on voit qu'il doit résulter de ce mouvement la production d'une série d'ondes, composées chacune d'une demi-onde condensée et d'une demi-onde dilatée, et se propageant dans la longueur du tuyau. Chacun des éléments de ces ondes, à mesure qu'il arrive sur la paroi solide qui constitue le fond d'un tuyau *fermé*, éprouve une réflexion : de là, la production d'ondes réfléchies marchant du fond vers l'orifice du tuyau. Ces deux mouvements se pro-

pagent dans la colonne d'air indépendamment l'un de l'autre, comme deux systèmes d'ondulations circulaires se propagent à la surface d'une nappe d'eau tranquille et se traversent sans se troubler. Chaque tranche d'air du tuyau est donc animée, à chaque instant, d'un mouvement dont la vitesse est la résultante de deux autres, savoir celle qui lui serait communiquée par l'onde directe seule, et celle qui y serait produite par l'onde réfléchie : cette vitesse résultante est égale à la somme des composantes quand celles-ci sont de même sens, et à leur différence quand elles sont de sens contraire. — De même, la compression ou la dilatation d'une tranche quelconque est la résultante des compressions ou des dilatations que chacun des deux mouvements vibratoires y occasionnerait, s'il existait seul.

En tenant compte de la superposition de ces effets, la théorie montre qu'il se forme, dans l'intérieur du tuyau : 1° des *nœuds fixes*, c'est-à-dire des tranches où la vitesse résultante est constamment nulle, mais où la compression ou la dilatation est plus grande que dans toute autre partie du tuyau, au même instant ; 2° des *ventres fixes*, c'est-à-dire des tranches où la vitesse résultante est plus grande que celle de toutes les autres tranches, au même instant, mais où il n'existe jamais ni compression ni dilatation. — Nous nous contenterons d'indiquer comment on peut constater, par l'expérience, l'existence des nœuds fixes et des ventres fixes.

Fig. 519.

1° Pour constater l'existence des nœuds, prenons un tuyau formé par un tube de verre long et mince T (*fig.* 519), et contenant un piston *p* guidé par une tige rigide. Plaçons d'abord ce piston à l'extrémité supérieure du tube ; nous aurons ainsi un véritable tuyau fermé. Réglons le vent de la soufflerie de manière à obtenir un des harmoniques, puis enfonçons graduellement le piston. On constate que l'on fait varier en général la hauteur du son ; mais il est facile de reconnaître que, pour certaines positions déterminées du piston, le son redevient ce qu'il était au départ. Ces positions correspondent à celles des nœuds de vibration, car, partout ailleurs, la substitution d'un piston solide et immobile, à une tranche d'air animée d'un mouvement vibratoire, produirait un changement dans la hauteur du son.

La même expérience montre que, *pour un harmonique déterminé, les nœuds fixes sont équidistants, et d'autant plus nombreux que cet harmonique est d'un ordre plus élevé.* — En outre, si l'on considère toujours un même harmonique, la distance du fond du tuyau au premier nœud est égale *à l'intervalle de deux nœuds consécutifs*, et la distance du dernier nœud à la bouche du tuyau est égale *à la moitié de ce même intervalle.*

2° Pour constater l'existence des ventres, on emploiera un tuyau prismatique de bois (*fig.* 520), et l'on déterminera d'avance la position des nœuds n', n', correspondants à l'harmonique qu'on veut lui faire rendre; puis, à égale distance de deux nœuds consécutifs, on pratiquera, dans l'une des faces, de petits trous v', v' qu'on puisse à volonté ouvrir ou fermer à l'aide de petites plaques de bois mobiles. Si l'on vient à découvrir l'une de ces ouvertures, ou même plusieurs à la fois, on reconnaît que le son du tuyau demeure exactement ce qu'il était d'abord. — Ce résultat ne peut se concevoir que si les tranches situées à la hauteur des ouvertures sont des ventres fixes. En effet, les ventres sont les seules tranches qui n'éprouvent jamais ni compression ni dilatation; ce sont donc aussi les seules tranches que l'on puisse mettre directement en communication avec l'air extérieur sans changer leur force élastique, c'est-à-dire sans modifier l'état de l'air dans l'intérieur du tuyau, et par suite sans altérer le son.

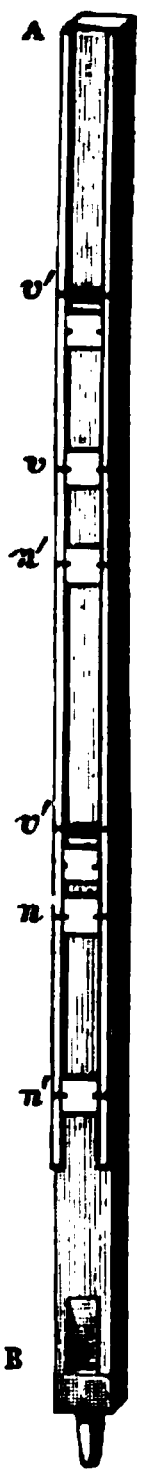


Fig. 520.

En résumé, on voit que, dans un tuyau fermé, les nœuds et les ventres consécutifs sont à des distances égales les uns des autres; que deux nœuds consécutifs sont toujours séparés par un ventre, et deux ventres consécutifs par un nœud. — Le fond du tuyau correspond à la position qui doit être occupée par un nœud, ce qui se conçoit, puisque la tranche d'air qui se trouve en contact avec lui ne peut subir aucun déplacement. — La bouche du tuyau correspond à un ventre, ce qui se conçoit encore, puisque la tranche d'air qui s'y trouve communique directement avec l'atmosphère, et doit être, à chaque instant, à la pression extérieure.

665. **Nœuds fixes et ventres fixes dans les tuyaux ouverts.** — Pour trouver la position des nœuds et des ventres dans les tuyaux ouverts, on peut employer la membrane de baudruche couverte de sable fin (*fig.* 516) : aux nœuds, le sable demeure immobile; aux ventres, il est plus vivement agité que partout ailleurs. On trouve encore ainsi que, comme dans les tuyaux fermés, les nœuds et les ventres alternent entre eux et sont également espacés. — Les deux extrémités du tuyau correspondent ici à des ventres, ce qui se conçoit facilement, puisqu'elles communiquent l'une et l'autre avec l'atmosphère (*).

666. **La distance de deux nœuds fixes ou de deux ventres fixes consécutifs est toujours égale à la moitié de la longueur de l'onde sonore.** — Prenons un tuyau sonore, ouvert ou fermé, et faisons-lui rendre, soit le son fondamental, soit l'un de ses harmoniques.

(*) Au premier abord, on ne voit pas qu'il puisse y avoir, dans un tuyau ouvert, réflexion de l'onde à l'extrémité du tuyau, et superposition de deux systèmes d'ondes se propageant en sens inverse. La théorie explique la production de ces deux systèmes

Déterminons, à l'aide de la sirène, le nombre n de vibrations produites dans l'unité de temps. Si l est la longueur de l'onde sonore, et v la vitesse de propagation du son dans l'air ; nous avons vu précédemment (642) que l'on a, en général, $v = nl$, et par suite :

$$l = \frac{v}{n}.$$

Ainsi, pour avoir la longueur de l'onde sonore, il suffit de diviser la vitesse du son par le nombre de vibrations exécutées dans l'unité de temps. En effectuant cette opération pour l'un quelconque des sons rendus par un tuyau, on trouve que l est égal au double de la distance qui sépare deux nœuds ou deux ventres consécutifs. — On voit donc que, si l'on désigne par D cette distance, on peut écrire, tant pour les tuyaux ouverts que pour les tuyaux fermés, et pour un harmonique quelconque :

$$D = \frac{l}{2}.$$ (*)

Fig. 521. Fig. 522.

d'ondes, nécessaire à la formation des nœuds et des ventres, en montrant qu'il se produit, sur le fond d'un tuyau ouvert, un phénomène de réflexion analogue à celui qui se produit sur le fond d'un tuyau fermé. On trouve seulement cette différence que, tandis qu'une demi-onde directe condensée, en se réfléchissant sur le fond d'un tuyau fermé, donne naissance à une demi-onde réfléchie condensée, au contraire, à l'orifice d'un tuyau ouvert, une demi-onde directe condensée détermine une demi-onde réfléchie qui est dilatée, et réciproquement.

(*) Ce résultat permet de retrouver très-simplement les lois des harmoniques qui ont été établies précédemment :

1° *Tuyau ouvert.* — Soit n (*fig.* 521) le fond du tuyau, qui correspond à un nœud, v' la bouche, qui correspond à un ventre ; les nœuds et les ventres intermédiaires, pour un harmonique déterminé, diviseront toujours la longueur nv' en un nombre impair de parties, égales au quart de la longueur d'onde de cet harmonique. Si donc on désigne par L la longueur du tuyau, par $2p + 1$ le nombre des subdivisions du tuyau et par l la longueur de l'onde correspondante, on aura :

$$(1) \qquad L = (2p + 1)\frac{l}{4}.$$

Si $p = 0$, auquel cas il n'y a aucun nœud ni ventre intermédiaire, le tuyau rend le son fondamental, et l'on obtient

$$l = 4\,L.$$

Ainsi, *la longueur d'onde qui correspond au son fondamental d'un tuyau fermé est égale à 4 fois la longueur de ce tuyau.*

Si, dans la relation (1), on remplace l par sa valeur $\frac{v}{n}$ (606), v désignant toujours la vitesse du son dans l'air et n le nombre des vibrations exécutées dans l'unité de temps, il vient $L = (2p + 1)\frac{v}{4n}$, d'où

$$n = (2p + 1)\frac{v}{4L}.$$

Pour avoir les nombres de vibrations du son fondamental et de ses harmoniques,

667. **Détermination indirecte de la vitesse du son dans les gaz et dans les liquides.** — Supposons qu'on fasse rendre à un tuyau sonore, ouvert ou fermé, un harmonique d'un certain ordre, et qu'on détermine, par l'expérience, la distance D qui sépare deux nœuds consécutifs. La longueur de l'onde produite dans l'air par le son obtenu sera 2D; si donc on désigne par n le nombre de vibrations par seconde qui correspond à ce son, et par v la vitesse de propagation du son dans l'air, on aura :

$$v = 2Dn. \qquad (1)$$

Faisons parler maintenant le même tuyau dans une enceinte remplie d'un gaz autre que l'air, et au moyen d'un courant de ce même gaz; amenons ce tuyau à donner le même harmonique de la série. D sera, comme précédemment, la distance de deux nœuds consécutifs, et, si n' désigne le nombre des vibrations produites et v' la vitesse de propagation du son dans ce gaz, on aura :

$$v = 2Dn'. \qquad (2)$$

De ces deux égalités (1) et (2), on tire $\frac{v'}{v} = \frac{n'}{n}$, c'est-à-dire :

$$v' = v \times \frac{n'}{n},$$

et, le nombre v étant connu, on en déduira la valeur de v'.

il faudra, dans cette formule, donner successivement à p toutes les valeurs entières 0,1,2,3... etc. La quantité $2p + 1$ devient alors successivement égale aux nombres impairs 1, 3, 5, 7,... etc., et comme $\frac{r}{4L}$ est constant, on retrouve la loi des harmoniques énoncé plus haut (663, 1°) : *Les nombres de vibrations qui répondent aux harmoniques d'un tuyau fermé varient comme les nombres impairs de la suite naturelle.*

2° *Tuyau ouvert.* — Dans le cas du son fondamental, les ventres qui correspondent aux deux extrémités du tuyau sont séparés par un nœud également distant de chacun d'eux. — Dans le cas d'un harmonique plus élevé, le tuyau se subdivise nécessairement en un nombre pair de parties, égales chacune à un quart de la longueur d'onde, comme le montre la figure 522. Donc :

$$L' = 2p' \frac{l}{4} = p' \frac{l}{2}, \qquad (2)$$

L' étant la longueur du tuyau et p' le nombre de ses subdivisions. Si, dans cette relation (2), on remplace l par $\frac{v}{n'}$, il vient $L' = p' \frac{v}{2n'}$, d'où

$$n' = p' \frac{v}{2L'}.$$

Ces résultats démontrent que :

La longueur d'onde du son fondamental d'un tuyau ouvert est double de la longueur du tuyau;

Les nombres de vibrations du son fondamental et des divers harmoniques varient comme les nombres de la suite naturelle. — C'est ce que l'expérience a démontré (663, 2°).

On pourra opérer de la même manière avec un gaz quelconque ou avec un liquide. — Dulong a déterminé, par cette méthode, les vitesses du son dans un certain nombre de gaz, et Wertheim les vitesses dans quelques liquides purs et dans quelques solutions salines.

Fig. 523. — Tuyau à anche battante.

668. **Tuyaux à anche.** — Une *anche* est une lame élastique qui est mise en vibration par l'impulsion de l'air; ordinairement, elle se place entre un tuyau qui amène l'air et une sorte de cornet, dit *cornet d'harmonie*, par lequel l'air s'échappe.

L'anche battante, représentée par la figure 523, s'applique exactement sur les bords d'une rigole demi-circulaire *r*, fermée horizontalement à sa partie inférieure. L'air amené par le tuyau T ne peut s'échapper qu'en soulevant un peu la lame métallique *l*; celle-ci revient, en vertu de son élasticité, pour se soulever de nouveau, et ainsi de suite. Elle accomplit donc une série de vibrations, en frappant à chaque fois les bords de la rigole; il en résulte un son d'un caractère particulier, dont le degré d'acuité dépend de la longueur de la *languette* ou lame vibrante : on règle cette longueur au moyen de la *rasette*, formée par un fil de fer replié *f*, qui fait ressort en *s*, sur la languette. Le timbre du son que rend l'anche battante a quelque chose d'éclatant et de nasillard ; on le rend plus agréable en adaptant au tuyau un cornet d'harmonie plus ou moins grand, tel que C. L'air du cornet vibre alors en même temps que l'anche : ses vibrations réagissent sur celles de l'anche, pour en modifier le ton, dans certaines limites, et surtout pour en adoucir le timbre.

L'anche libre (*fig.* 524), imaginée par Grenié, présente une disposition analogue; mais la languette *l* ne touche pas les bords de l'ouverture par laquelle s'échappe le vent, elle oscille librement des deux côtes du plan de cette ouverture, et produit ainsi des sons moins stridents. On l'emploie peu dans les grandes orgues, mais elle figure exclusivement dans l'harmonium et dans l'orgue expressif.

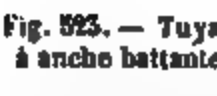


Fig. 524. Anche libre.

669. **Notions générales sur les instruments à vent.** — Tous les instruments à vent dont on fait usage en musique se rapportent aux

différents types de tuyaux sonores que nous venons d'étudier. Les uns, comme les orgues, sont des instruments à *sons fixes*, et exigent au moins autant de tuyaux qu'ils doivent produire de notes différentes; les autres sont des instruments à *sons variables*, et ne présentent qu'un seul tuyau sonore : tels sont la flûte, la clarinette, le cor, etc.

Dans les *orgues*, on emploie des tuyaux à bouche, ouverts ou fermés, et des tuyaux à anches, munis de cornets de diverses formes. Ils sont tous montés sur un même sommier, qui reçoit l'air de soufflets puissants. — Des *registres* particuliers permettent à l'organiste de produire à volonté chaque note au moyen des tuyaux de l'une ou de l'autre espèce : de là, les effets si variés et si imposants qu'on obtient avec ces instruments.

Dans la *flûte*, le mode d'ébranlement de l'air est le même que dans les tuyaux ordinaires. Le vent, donné par la bouche du joueur, se brise contre les bords de l'ouverture; une partie pénètre dans le tuyau et y produit les vibrations sonores. Des trous pratiqués de distance en distance peuvent être ouverts ou fermés, soit avec les doigts, soit à l'aide de clefs à ressorts; quand l'exécutant découvre un de ces trous, il détermine dans la tranche d'air correspondante un ventre de vibration, modifie par conséquent la distribution des nœuds et des ventres à l'intérieur du tuyau, et fait varier la hauteur du son.

Le *cor de chasse* est un tuyau d'une grande longueur, contourné plusieurs fois sur lui-même et s'ouvrant par un *pavillon* élargi; en raison de la longueur, il ne donne pas le son fondamental, mais seulement les harmoniques supérieurs 8, 9, 10, etc., suivant qu'on force plus ou moins le vent. Ces harmoniques représentent presque toutes les notes de la gamme; on obtient celles qui manquent en fermant plus ou moins, avec le poing, l'ouverture du pavillon.

Le *hautbois*, la *clarinette* et le *basson* sont des instruments à anche; les lèvres y font l'office de rasette. — Dans la *trompette*, les lèvres jouent le rôle de véritables anches. — Dans le *trombone*, l'exécutant allonge ou raccourcit à volonté le tuyau sonore, et produit ainsi des sons plus ou moins élevés. — Dans le *cornet à piston*, il modifie la longueur du tuyau au moyen de pistons, qui interrompent ou font entrer dans le circuit vibrant diverses portions supplémentaires.

CHAPITRE IV

VIBRATIONS DES CORPS SOLIDES

I. — VIBRATIONS DES CORDES

670. Lois des vibrations transversales. — Lorsqu'une corde flexible est tendue, et fixée par ses deux extrémités, on peut en tirer des sons en la faisant vibrer soit transversalement, soit longitudinalement. — Nous étudierons d'abord les vibrations *transversales*.

On produit les vibrations transversales en pinçant la corde, c'est-à-dire en l'écartant de sa position d'équilibre pour l'abandonner ensuite à elle-même, ou bien en la frottant avec un archet perpendiculairement à sa longueur. — Dans l'un ou l'autre cas, chacun de ses points exécute, perpendiculairement à la direction primitive de la corde, une série d'oscillations, de part et d'autre de sa position d'équilibre. Ces oscillations, dont les amplitudes décroissent à cause de la résistance de l'air et de la rigidité de la corde, sont isochrones, car le son conserve une hauteur constante aussi longtemps que durent les vibrations.

Elles sont soumises aux lois suivantes : *Toutes choses égales d'ailleurs, les nombres des vibrations exécutées par deux cordes dans des temps égaux varient :*

1° *En raison inverse des longueurs;*
2° *En raison inverse des diamètres;*
3° *Proportionnellement aux racines carrées des poids tenseurs;*
4° *En raison inverse des racines carrées des poids spécifiques.*

Ces quatre lois sont évidemment comprises dans la formule suivante, qui est due à Lagrange :

$$n = \frac{1}{2rl}\sqrt{\frac{gP}{d\pi}};$$

n désigne ici le nombre des vibrations effectuées dans une seconde; r est le rayon et l la longueur de la corde, d son poids spécifique, et P est le poids qui la tend; g est l'accélération due à la pesanteur, exprimée au

moyen de la même unité que les autres quantités linéaires r et l ; enfin π est le rapport de la circonférence au diamètre, égal à 3,1416 (*).

671. **Vérifications expérimentales des lois précédentes à l'aide du sonomètre.** — Le *sonomètre* (*fig.* 525) se compose d'une caisse MN en bois de sapin, sur laquelle sont fixées deux cordes métalli-

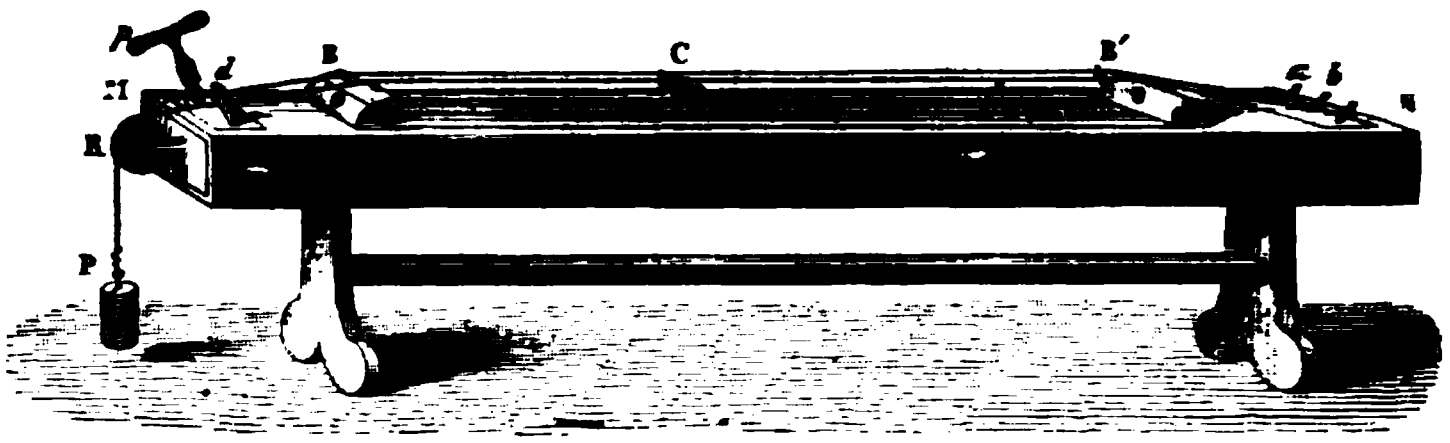


Fig. 525. — Sonomètre.

ques. — La première *ad* est disposée comme les cordes d'un piano; la seconde *b*R passe en R sur une poulie de renvoi, et peut être tendue à l'aide d'un poids variable P. Toutes deux s'appuient sur les chevalets B et B′ ; des chevalets mobiles, tels que C, peuvent glisser sous les cordes et permettre de limiter à volonté la longueur de leurs parties vibrantes; la position de ces chevalets mobiles est donnée par une division en millimètres, tracée sur la caisse.

1° Pour vérifier la *loi des longueurs*, on fait vibrer d'abord la corde *ad* tout entière, puis, prenant pour *ut* le son ainsi obtenu, on déplace successivement le chevalet mobile, de manière à produire, par exemple, les notes *mi*, *sol*, ut_2. On trouve que les longueurs correspondantes sont :

Notes	ut_1	*mi*	*sol*	ut_2.
Longueurs.	1	$\frac{4}{5}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$

(*) Cette formule permet de trouver, non-seulement le rapport entre les nombres de vibrations que deux cordes exécutent dans le même temps, mais encore le nombre absolu des vibrations d'une corde quelconque dans l'unité de temps; pour l'appliquer à cette détermination, on exprime les longueurs r, l et g au moyen d'une même unité linéaire, arbitrairement choisie, et l'on prend pour unité de poids, dans l'évaluation de P, le poids du cube d'eau dont le côté est égal à l'unité de longueur. — Veut-on trouver, par exemple, le nombre de vibrations d'une corde de fer ayant 1 mètre de longueur, 2 dixièmes de millimètre de rayon et tendue par un poids de 10 kilogrammes, on exprimera l, r et g en décimètres, P en kilogrammes, et l'on aura :

$$n = \frac{1}{2 \times 0{,}002 \times 10} \sqrt{\frac{98{,}088 \times 10}{3{,}1416 \times 7{,}8}} = 158{,}15.$$

Ce nombre de vibrations correspond à un son compris entre ut_2 et ut_3 ; et si l'on divise 158,15 par le nombre de vibrations de ut_2, savoir 130,5, on trouve 1,212, résultat très-peu différent de $1{,}200 = \frac{5}{4} : \frac{25}{24}$, qui mesure l'intervalle de *ut* à *mi* ♭. La note donnée par la corde se confond donc à peu près exactement avec *mi* $\flat_2$.

Or, d'après ce qu'on a vu (652), les nombres de vibrations de ces notes sont entre eux comme

$$1 \qquad \frac{5}{4} \qquad \frac{3}{2} \qquad 2$$

ils sont donc en raison inverse des longueurs correspondantes.

2° Pour vérifier la *loi des diamètres*, on choisit, par exemple, quatre cordes de même nature, dont les diamètres seront entre eux comme les nombres 4, 3, 2, 1; on fixe ces quatre cordes tour à tour dans la position *b*R, en employant le même poids P pour les tendre. La première étant placée, on met la corde *ad* à l'unisson avec elle, en réglant sa tension à l'aide de la clef *p*; on la remplace ensuite successivement par les trois autres, et l'on compare les sons qu'elles rendent avec celui de la corde fixe. — On trouve que les quatre sons peuvent être représentés, dans l'échelle musicale, par les notes

$$ut_1 \qquad fa_1 \qquad ut_2 \qquad ut_3,$$

dont les nombres de vibrations sont entre eux comme

$$1 \qquad \frac{4}{3} \qquad 2 \qquad 4,$$

ou comme

$$\frac{1}{4} \qquad \frac{1}{3} \qquad \frac{1}{2} \qquad 1.$$

ces nombres de vibrations sont donc en raison inverse des diamètres.

3° La *loi des tensions* se constate d'une manière analogue. La corde *b*R étant chargée d'un certain poids, on met *ad* à l'unisson avec elle. Puis on la charge tour à tour d'un poids égal à 4, 9, 16 fois le poids primitif. On trouve ainsi :

Poids tenseurs.	1	4	9	16
Sons rendus par la corde. . .	ut_1	ut_2	sol_2	ut_3
Nombres de vibrations. . . .	1	2	3	4

4° Enfin, pour la *loi des poids spécifiques*, on peut faire usage de deux cordes de même diamètre, l'une de platine et l'autre de fer, et constater que, sous l'action de poids égaux, des longueurs égales de ces deux cordes produisent des sons dont l'intervalle est peu différent du rapport des racines carrées des poids spécifiques, c'est-à-dire de

$$\sqrt{\frac{7,79}{23}}$$

672. **Harmoniques des cordes.** — On peut, en opérant comme nous allons l'indiquer, tirer d'une même corde, sans en changer la tension, une série de sons différents qu'on nomme ses *harmoniques*. Le plus grave de ces sons, celui que nous avons seul considéré jusqu'ici, s'appelle le *son fondamental*.

1° Soit AB (*fig.* 526) l'une des cordes du sonomètre; pour obtenir le son fondamental, on attaquera cette corde en un point situé à peu de distance de son milieu M. Le gonflement apparent que la corde éprouve montre que tous ces points vibrent perpendiculairement à sa longueur,

Fig. 526.

et que l'amplitude des vibrations est plus grande au milieu que partout ailleurs. Le point M prend le nom de *ventre de vibration*, et l'on appelle *nœuds* les extrémités fixes A et B, qui seules ne vibrent pas.

2° Plaçons maintenant le chevalet mobile C du sonomètre sous le milieu de la corde, et appuyons la corde très-légèrement avec le doigt sur l'arête du chevalet ; représentons la corde au repos par la droite A'B', et soit M' son milieu. Si l'on attaque avec l'archet l'une des moitiés, A'M' par exemple, on obtient un son que l'on reconnaît pour l'*octave aiguë* du son fondamental, et qui, par conséquent, correspond à un nombre *double* de vibrations dans le même temps. — Pour expliquer la production de ce deuxième son, il faut observer que le milieu M' de la corde, maintenu par la pression du doigt, ne peut prendre aucun mouvement vibratoire, et devient par conséquent un *nœud*, mais que la deuxième moitié M'B' entre en vibration, en même temps que A'M'; en effet, si l'on place de petits chevrons de papier sur différents points de M'B', ces chevrons sont renversés dès qu'on attaque avec l'archet un point de A'M' situé à quelque distance de son milieu. Donc, dans cette expérience, la corde s'est divisée en deux parties qui vibrent séparément, comme feraient deux cordes de longueur moitié moindre: le son produit doit donc être l'octave aiguë du son fondamental (*).

3° On peut également tirer d'une corde un son correspondant un nombre de vibrations triple de celui du son fondamental. Soit A''B'' la posi-

(*) L'expérience suivante, due à Duhamel, montre d'ailleurs que les deux moitiés de la corde vibrent en sens contraire, c'est-à-dire que, tandis que A'M' s'infléchit d'un côté de sa position d'équilibre, M'B' s'infléchit de l'autre côté, comme le représente la figure. La corde étant légèrement appuyée par son milieu sur un chevalet, si on l'attaque en même temps des deux côtés de ce point, avec deux archets mis en mouvement dans le même sens, on n'obtient aucun son, tandis qu'on obtient immédiatement l'octave du son fondamental quand on fait mouvoir les deux archets en sens contraire. Dans le premier cas, l'action des deux archets tendait à produire, dans les deux moitiés de la corde, des vibrations de même sens ; dans le second cas, des vibrations de sens contraire.

tion d'équilibre de la corde, D et D′ les points qui la divisent en trois parties égales; plaçons le chevalet sous le point D, appuyons légèrement la corde sur l'arête de ce chevalet, et attaquons avec l'archet le premier tiers A″D. Si le son fondamental est ut_1, on entendra maintenant sol_2, qui correspond à un nombre triple de vibrations. — Si l'on place encore des chevrons de papier sur différents points de DB″, on constate que, à l'instant où l'on fait agir l'archet, tous ces chevrons se renversent, à l'exception de celui qui était placé au point D′. Le point D′ est donc un *nœud*, aussi bien que le point D, et la corde s'est subdivisée en trois parties égales, vibrant chacune séparément.

Ces résultats se généraliseraient sans difficulté; on les manifeste quelquefois en employant une corde blanche, longue de 2 mètres environ, et tendue au-dessus d'une planchette noire; pendant la vibration, la corde paraît se partager en segments, renflés chacun en leur milieu et séparés par des étranglements qui correspondent aux nœuds.

Les sons que nous venons d'étudier sont les seuls que puisse donner une corde vibrant transversalement, quand sa tension demeure constante. La série des harmoniques est donc donnée par la loi suivante :

Les nombres de vibrations des harmoniques d'une corde qui vibre transversalement varient comme les nombres entiers de la suite naturelle. — Cette loi est la même que celle des harmoniques des tuyaux ouverts (663, 2°).

* 673. **Vibrations longitudinales.** — Pour faire vibrer longitudinalement les cordes, on les frotte dans le sens de leur longueur, avec du drap couvert de colophane.

La formule suivante, qui est due à Lagrange, permet de calculer le nombre de vibrations n' du son fondamental : on a :

$$n' = \frac{1}{2rl}\sqrt{\frac{gk}{\pi d}},$$

en désignant par r, l et d le rayon, la longueur et le poids spécifique de la corde, par k son *coefficient d'élasticité*, c'est-à-dire le poids tenseur qu'il faudrait appliquer à une corde de même nature, et dont la section serait 1 millimètre carré, pour produire un allongement égal à sa longueur primitive (en supposant qu'il soit physiquement possible de réaliser un pareil allongement) (*).

En comparant cette formule avec celle des vibrations transversales (670), on a :

$$\frac{n'}{n} = \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{\mathrm{P}}}.$$

(*) On voit que les lois des vibrations longitudinales sont les mêmes que celles des vibrations transversales, à l'exception de celle qui se rapporte aux tensions de la corde; en effet n et n' varient l'un et l'autre en raison inverse de la longueur, du diamètre et de la racine carrée du poids spécifique; mais, tandis que n dépend de la grandeur des poids tenseurs, n' en est indépendant.

Comme *k* est très-grand par rapport à P, on voit que le son fondamental dû aux vibrations longitudinales doit être beaucoup plus aigu que celui des vibrations transversales. — C'est ce que l'expérience confirme.

Les harmoniques des vibrations longitudinales se représentent, comme ceux des vibrations transversales, par la série des nombres naturels.

674. **Notions générales sur les instruments à cordes.** — Les instruments à cordes qu'on emploie en musique sont tous fondés sur les lois des vibrations transversales. Les uns, comme le piano et la harpe, sont des instruments *à sons fixes* et exigent au moins autant de cordes qu'ils doivent produire de notes différentes; les autres, tels que le violon, le violoncelle et la guitare, sont des instruments *à sons variables* et emploient un nombre de cordes bien moins considérable.

Dans le *piano*, les vibrations sont produites par le choc des marteaux articulés que les touches font mouvoir. Chaque fois qu'on abaisse une touche du clavier, elle soulève un *étouffoir* qui, en retombant quand on abandonne la touche, éteint ensuite les vibrations des cordes correspondantes. Au moyen de la *pédale*, on peut éloigner à la fois tous les étouffoirs : les vibrations se prolongent alors beaucoup plus longtemps.

La *harpe* établit le passage des instruments à sons fixes aux instruments à sons variables. Les cordes, qu'on fait vibrer en les pinçant avec les doigts, correspondent aux notes naturelles de la gamme : à l'aide des pédales, on peut changer les longueurs des parties vibrantes et obtenir les dièzes et les bémols.

Dans le *violon*, le *violoncelle* et la *guitare*, chaque corde peut produire un grand nombre de sons, suivant la longueur qu'on donne à la partie vibrante. Cette longueur est déterminée par la pression des doigts de la main gauche : la main droite fait mouvoir l'archet, ou sert à pincer les cordes. — Dans ces trois instruments, l'expérience montre, ainsi qu'on l'indiquera plus loin, que les vibrations se communiquent à la face supérieure de la caisse, par tous les points où la corde est en contact avec elle; de celle-ci à la face inférieure, soit par les côtés, soit à l'aide d'une pièce intermédiaire qu'on appelle l'*âme;* enfin, des deux faces à l'air intérieur : toutes ces vibrations simultanées produisent un renforcement du son. Le mérite de l'instrument dépend du plus ou moins de perfection et d'égalité avec lequel le renforcement s'opère pour tous les sons possibles; il est donc essentiellement subordonné à la qualité des bois et à la disposition relative des parties.

II. — VIBRATIONS DES VERGES ÉLASTIQUES

675. **Caractères distinctifs des verges.** — Les verges ou tiges rigides se distinguent des cordes en ce qu'elles ont par elles-mêmes une forme déterminée, à laquelle elles tendent à revenir quand on cesse de faire agir sur elles les forces extérieures qui peuvent les avoir déformées.

Elles peuvent, comme les cordes, exécuter des vibrations longitudinales ou des vibrations *transversales*.

676. **Vibrations transversales des verges.** — L'étude complète des vibrations transversales des verges exigerait que l'on tint compte de la manière dont chacune de leurs extrémités est fixée ou soutenue. — Nous nous contenterons d'énoncer les lois générales suivantes :

Pour des verges prismatiques *semblablement assujetties*, les nombres de vibrations qui correspondent au son fondamental sont :

1° *Inversement proportionnels aux carrés des longueurs;*

2° *Directement proportionnels aux épaisseurs;*

3° *Indépendants de la largeur*, pourvu que celle-ci soit très-petite par rapport à la longueur.

On entend ici par *épaisseur* celle des deux dimensions transversales qui est parallèle au plan dans lequel s'effectuent les vibrations, et par *largeur* la dimension perpendiculaire à ce plan.

Quel que soit le mode de fixation des tiges, les lois précédentes subsistent, pourvu qu'on ne compare entre elles que des tiges semblablement assujetties; on peut d'ailleurs les encastrer à l'une de leurs extrémités en les laissant libres à l'autre, ou les encastrer à leurs deux extrémités, ou les appuyer par l'une ou l'autre extrémité contre un plan fixe, etc. — Au contraire, si l'on assujettit successivement une même tige de plusieurs manières différentes, on constate que le son fondamental varie avec le mode d'assujettissement.

Pour vérifier les lois énoncées, dans le cas particulier où la verge est encastrée à l'une de ces extrémités et libre à l'autre, on prend une verge telle que AB (*fig.* 527) dont on fixe un point C entre les mâchoires d'un étau : lorsqu'on l'infléchit suivant C*a*, pour l'abandonner ensuite à elle-même, ou qu'on l'excite avec un archet dans une direction perpendiculaire à sa longueur, comme le représente la figure 508, elle exécute, de part et d'autre de sa position d'équilibre, une série d'oscillations dont l'amplitude va en décroissant, mais qui restent isochrones; la verge produit alors un son continu, pourvu que la partie vibrante CA n'ait pas une trop grande longueur. — Dans ces conditions,

Fig. 527.

on reconnaît, par exemple, qu'en réduisant cette longueur à moitié, on élève le son de deux octaves, etc.

Pour faire rendre à une verge un de ses sons harmoniques, on détermine la formation de nœuds en certains de ces points, en appuyant ces points contre des chevalets fixes, ou en les serrant entre les doigts : si la verge est placée horizontalement, on constate la formation des nœuds en couvrant la face supérieure de la verge de sable fin, lequel est chassé des parties vibrantes et s'accumule sur les lignes de repos. — On reconnaît ainsi que le mode de distribution de ces nœuds, de même que les rapports des nombres de vibrations des harmoniques consécutifs, dépend essentiellement de la manière dont on assujettit la verge ; que d'ailleurs, dans chaque cas particulier, ils suivent des lois plus compliquées que celles qui déterminent les nœuds et les harmoniques transversaux des cordes vibrantes.

677. **Applications des vibrations transversales des verges.** — Le *diapason*, le *violon de fer*, les *boîtes à musique*, le *triangle* dont on fait un fréquent usage dans les orchestres, sont des applications des vibrations transversales des verges.

Le *diapason* peut être mis en vibration soit à l'aide d'un archet, soit à l'aide d'un petit cylindre de bois ou de métal qu'on fait passer de force entre les extrémités de ses branches (*fig.* 528). Ce petit appareil est employé pour régler le ton des autres instruments : le plus souvent il donne la note la_3 qui répond, comme on sait, à 435 vibrations par seconde.

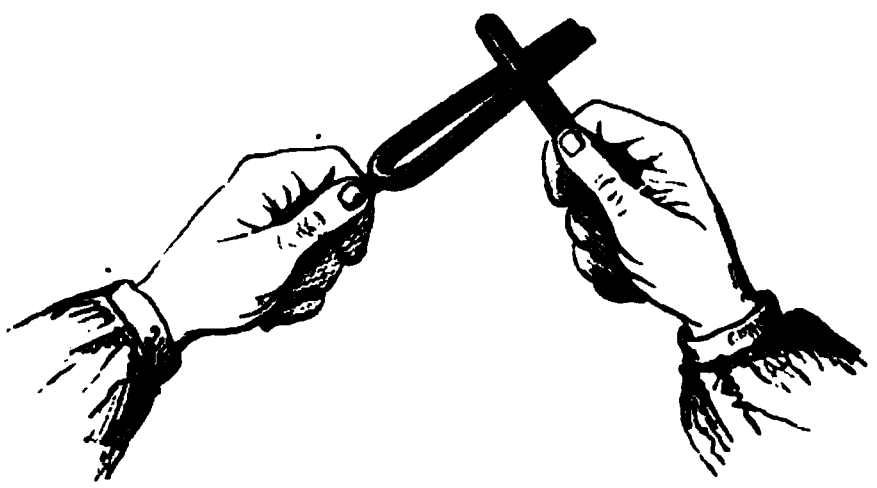


Fig. 528.

Le *violon de fer* est formé d'un certain nombre de tiges d'acier, disposées perpendiculairement sur une table sonore, et rangées suivant une demi-circonférence, afin que l'archet puisse n'en toucher qu'une seule à la fois.

Dans les *boîtes à musique*, de petites lames d'acier de longueurs différentes sont implantées, comme les dents d'un peigne, sur une tige commune. Un cylindre, dont l'axe est parallèle à cette tige et dont la surface est garnie de pointes, est placé tout près du plan des lames. Un mécanisme d'horlogerie lui imprime un mouvement régulier autour de son axe ; les pointes soulèvent tour à tour et abandonnent ensuite les petites lames d'acier, qui vibrent et font entendre un chant musical, réglé par le mode de distribution des pointes sur la surface cylindrique.

678. **Vibrations longitudinales des verges.** — On produit des vibrations longitudinales en frottant une tige de bois ou de métal, dans le sens de la longueur, avec les doigts imprégnés de colophane (*fig.* 529),

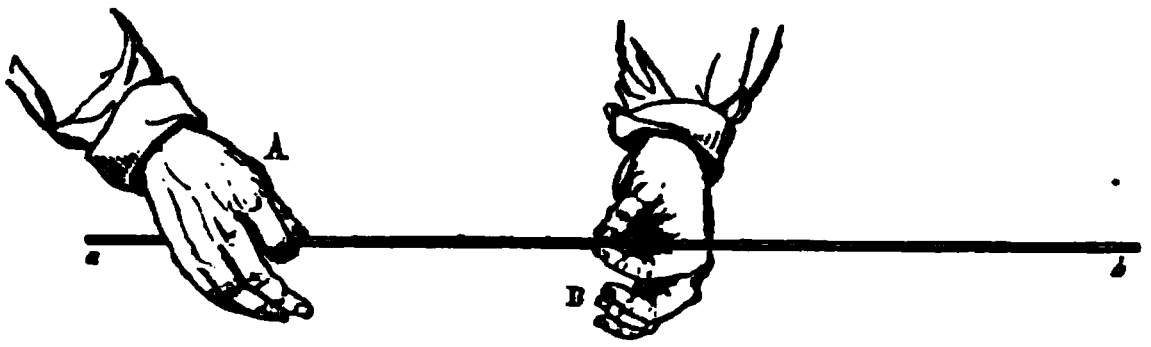


Fig. 529.

ou une tige de verre avec un morceau de drap mouillé (*fig.* 530).— Si la verge est fixée en son milieu K, et que l'extrémité A s'appuie contre une bille d'ivoire C suspendue à un fil FC, on constate que, dès que la

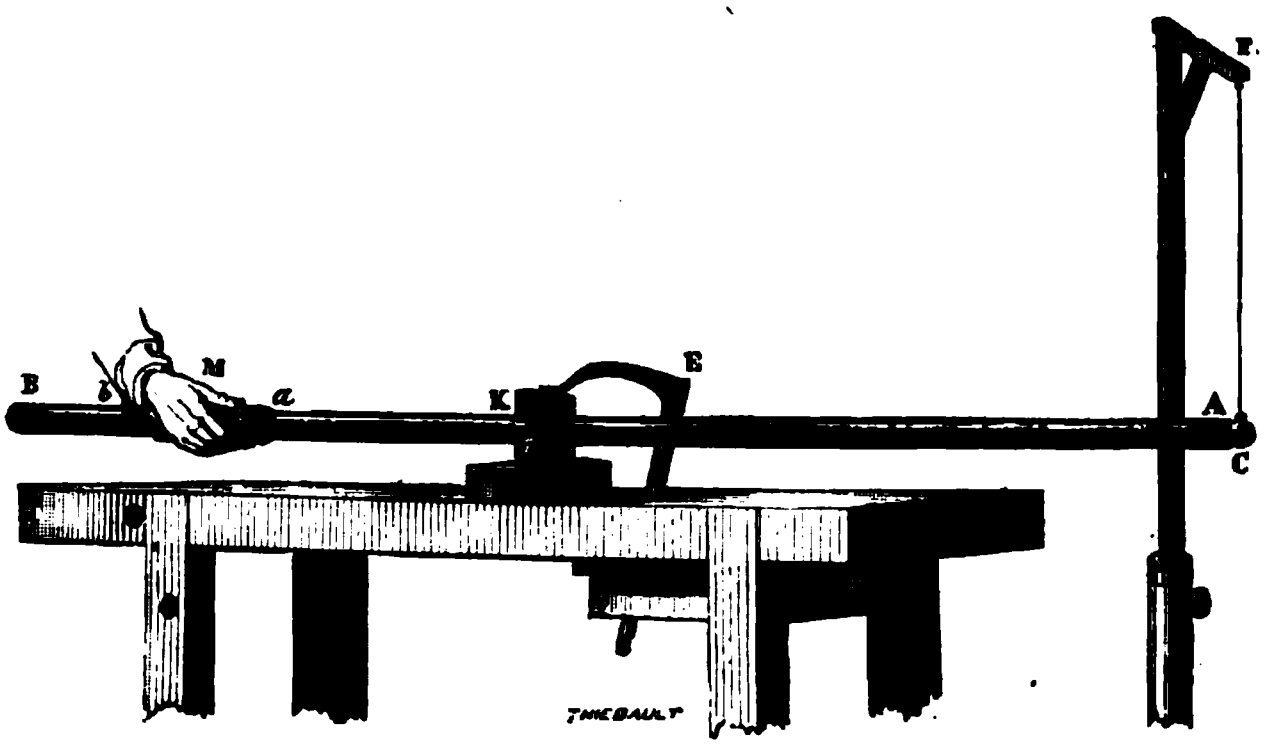


Fig. 530.

verge rend un son, la bille est vivement projetée par les vibrations parallèles à l'axe de la verge. — Les sons ainsi obtenus sont remarquables par leur douceur et leur pureté.

Nous examinerons successivement les trois cas suivants :

1° *Une extrémité de la verge est fixée et l'autre libre.* — Les lois sont les mêmes que celles des *tuyaux fermés*; c'est-à-dire que, pour une même verge, les nombres de vibrations qui correspondent au son fondamental et aux harmoniques successifs varient *comme les nombres impairs de la série naturelle.* — Pour des verges de même nature et de longueurs différentes, les nombres de vibrations du son fondamental sont *inversement proportionnels aux longueurs.*

2° *Les deux extrémités sont libres.* — Pour maintenir la verge, il faut alors fixer, soit son milieu (*fig.* 529 et 530), soit un autre point de sa

longueur. Le point fixe devient un nœud de vibration, tandis que les extrémités sont des ventres. — Les lois sont alors les mêmes que pour les *tuyaux ouverts*; c'est-à-dire que les nombres de vibrations correspondant au son fondamental et aux divers harmoniques varient *comme les nombres de la série naturelle*. — Pour des verges de même nature et de longueurs différentes, les nombres de vibrations des sons fondamentaux sont *inversement proportionnels aux longueurs*.

3° *Les deux bouts de la verge sont fixés*. — Ce cas est analogue à celui des *cordes vibrant longitudinalement :* les harmoniques varient *comme les nombres de la série naturelle* 1, 2, 3... — Pour des verges de même nature et de longueurs différentes, les nombres de vibrations des sons fondamentaux et des harmoniques de même ordre sont *inversement proportionnels aux longueurs*.

* 679. **Application des lois précédentes à la détermination indirecte de la vitesse du son dans les solides.** — L'analogie que présentent les lois des vibrations longitudinales des verges, dans les deux premiers cas examinés, avec les lois des vibrations de l'air dans les tuyaux sonores, a conduit Chladni à une méthode simple pour trouver la vitesse de propagation du son dans les corps solides.

Supposons que l'on fasse vibrer longitudinalement une tige solide, soutenue par son milieu (678, 2°); soit l la longueur de cette tige, n' le nombre des vibrations qu'elle exécute par seconde, lorsqu'elle donne le son fondamental, et v' la vitesse du son dans la substance dont elle est formée. Comme il y a un nœud au milieu, et un ventre à chaque extrémité, la distance de deux ventres consécutifs est l; par conséquent les ondes qui se propagent dans la tige ont pour longueur $2l$. On a donc

$$v' = 2n'l.$$

Or, pour un tuyau ouvert de même longueur l que la tige et rendant le son fondamental dans l'air, on aurait (667) :

$$v = 2nl,$$

v étant la vitesse de propagation dans l'air et n le nombre de vibrations correspondant au son fondamental. De ces deux relations, on déduit :

$$\frac{v'}{v} = \frac{n'}{n}.$$

Chladni a déterminé, par cette méthode, les vitesses de propagation du son dans le verre, dans quelques métaux, et dans des tiges de bois de diverses espèces.

III. — VIBRATIONS DES PLAQUES ET DES MEMBRANES

680. **Vibrations des plaques. — Lignes nodales.** — Une plaque métallique telle que C (*fig.* 531) étant fixée sur un pied, par son centre de figure, faisons-la vibrer en frottant avec l'archet l'un des points de son contour, et en appuyant fortement le doigt sur un autre point : selon que ces deux points occuperont telle ou telle position, nous obtiendrons

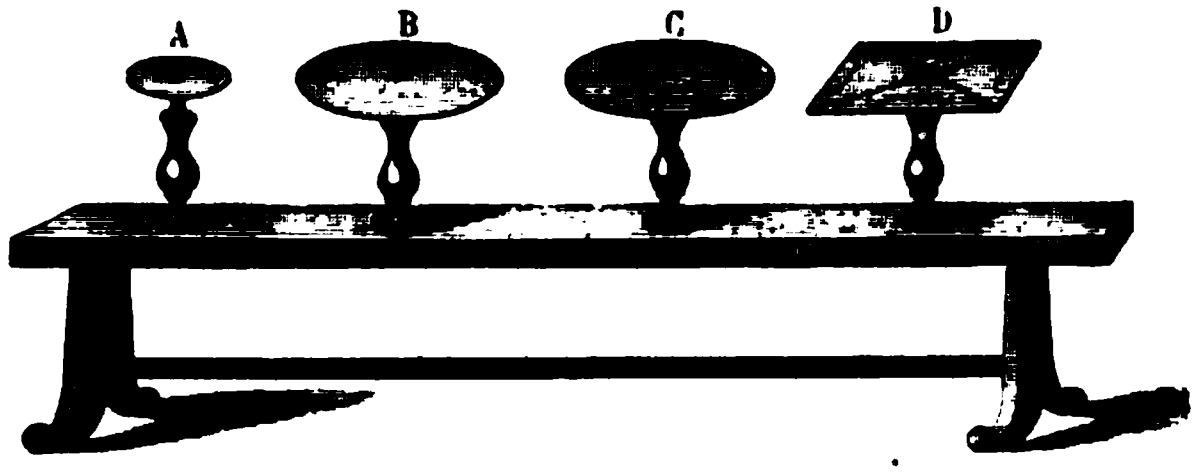


Fig. 531.

une série de sons différents. — Si, dans chaque cas, on a couvert uniformément de sable fin la surface de la plaque, on voit ce sable prendre des mouvements rapides, qui le portent vers certaines lignes où il s'accumule. Ces lignes sont évidemment des nœuds de vibration, ou, plutôt des *lignes nodales* ou *lignes de repos :* elles partagent la plaque en un certain nombre de parties qui vibrent séparément, comme le font, par exemple, les deux moitiés d'une corde qui donne l'octave du son fondamental (*).

(*) Cette comparaison peut se poursuivre plus loin encore. Lorsqu'une corde se divise en deux ou plusieurs parties vibrantes, séparées par des nœuds, les vibrations sont de sens contraires dans deux segments consécutifs : il en est de même pour les plaques.

Supposons qu'on soit parvenu à tirer d'une plaque circulaire un son correspondant à 4 lignes nodales diamétrales (*fig.* 532), et que la plaque se trouve divisée par ces lignes en 8 secteurs égaux. Si deux secteurs contigus, tels que A et B, vibrent en sens inverse, c'est-à-dire si l'un d'eux s'infléchit au-dessous du plan primitif de la plaque au moment où l'autre se courbe au-dessus de ce plan, ils enverront évidemment à l'oreille, à chaque instant, des vitesses de sens contraires ; en d'autres termes, le son dû aux vibrations des secteurs A, A′, A″, A‴ et le son dû aux vibrations des secteurs B, B′, B″, B‴ se détruiront en partie. Pour justifier cette conséquence du principe énoncé, M. Lissajous a eu l'idée ingénieuse de fixer, un peu au-dessus de la plaque, un carton formé de 4 sec-

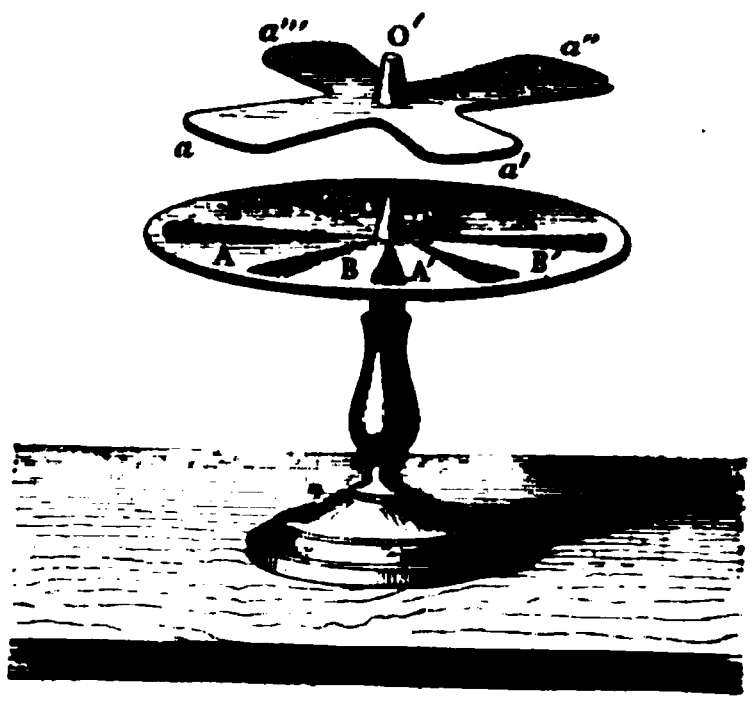


Fig. 532.

Mais, tandis qu'une corde ébranlée transversalement peut exécuter des vibrations autour de ses extrémités sans qu'il se produise des nœuds intermédiaires, une plaque présente toujours des lignes nodales, même quand elle rend le son le plus grave, ou son fondamental de la série.

L'expérience montre que, *pour une même plaque, la production d'une même figure nodale est constamment accompagnée du même son*; mais la réciproque n'est pas vraie, et *un même son peut correspondre à des dispositions différentes des lignes nodales*.

681. **Comparaison des harmoniques d'une même plaque. — Classification des figures nodales.** — Savart a été conduit à établir, entre les figures nodales qui correspondent aux divers harmoniques d'une même plaque, des rapprochements remarquables. — Pour conserver les formes de ces figures nodales, et les comparer aisément entre elles, il les produisait au moyen d'une poudre formée de gomme et de tournesol pulvérisés ensemble; il appliquait sur la figure obtenue une feuille de papier, humectée d'eau gommée : la poudre adhérait au papier, sur lequel le dessin venait s'imprimer en bleu.

1° *Plaques circulaires homogènes.* — Les lignes nodales des plaques circulaires, homogènes et fixées par leur centre, peuvent être rapportées à deux systèmes de lignes, savoir : des *diamètres*, et des *circonférences* concentriques avec les bords de la plaque.

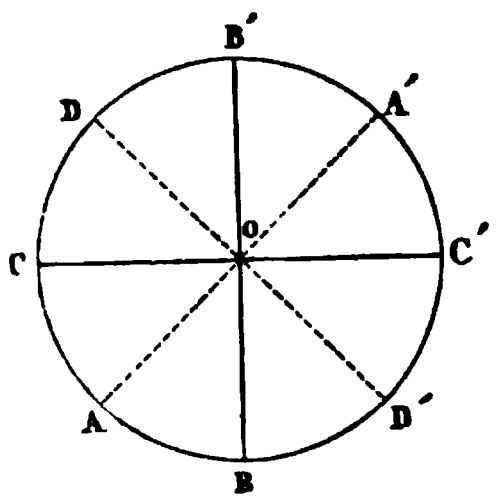


Fig. 533.

Par exemple, on obtient deux diamètres perpendiculaires en attaquant doucement la plaque par un point quelconque de sa circonférence, sans toucher aucun autre point avec le doigt. — Si l'on appuie les doigts sur les deux extrémités d'un arc de 45 degrés, tel que AB (*fig.* 533), et si l'on attaque le point milieu de cet arc, on détermine la formation de deux lignes nodales diamétrales AA′ et BB′; en même temps, apparaissent les deux autres diamètres CC′ et DD′ qui, avec les premiers, divisent la plaque en huit secteurs égaux.

Pour obtenir une ou plusieurs lignes circulaires, il suffit de fixer perpendiculairement au plan de la plaque et en son centre de figure une verge métallique, qu'on fait vibrer longitudinalement.

Dans certains cas, les deux systèmes se produisent en même temps, et, pour les harmoniques élevés, ils donnent quelquefois naissance, par leur combinaison, à des courbes de formes assez compliquées.

teurs a, a', a'', a''', qui correspondent aux parties A, A′, A″, A‴; il suffit pour cela de placer le cône creux O′ sur le pivot O. Le carton arrête les vibrations excitées dans l'air par les secteurs A, et ne laisse arriver jusqu'à l'oreille que les mouvements concordants déterminés par les secteurs B; il se produit alors un renforcement du son.

2° *Plaques polygonales homogènes.* — Sur les plaques polygonales, homogènes et fixées par leur centre, les lignes nodales sont *parallèles aux lignes de plus grande et de plus petite résistance à la flexion.* — De là résulte que, si le polygone a un nombre pair de côtés, elles seront parallèles soit aux rayons, soit aux apothèmes; si le nombre des côtés est impair, elles seront parallèles, soit à la direction commune des rayons et des apothèmes, soit aux côtés du polygone.

Par exemple, avec une plaque carrée, on obtiendra, en attaquant doucement le milieu d'un côté, deux lignes nodales diagonales; pour une pression plus énergique de l'archet, on aura, en outre, les courbes représentées sur la plaque D (*fig.* 531). Si l'on fait vibrer un point voisin d'un sommet, les quatre sommets du carré seront des ventres de vibration, et l'on pourra obtenir deux droites perpendiculaires, parallèles aux côtés du polygone.

3° *Plaques non homogènes.* — Enfin, avec les plaques non homogènes, qui n'ont pas la même élasticité dans tous les sens, on trouve encore quelques résultats intéressants. — Supposons une plaque circulaire de bois, taillée parallèlement aux fibres (*fig.* 534). Le diamètre AB, dont la direction se confond avec celle des fibres, et le diamètre CD, perpendiculaire au premier, sont évidemment les lignes de plus grande et de plus petite résistance à la flexion. Ces deux diamètres sont les seuls qui puissent devenir des lignes nodales; on les obtient en attaquant avec l'archet le milieu d'un arc tel que AC. Quand on attaque une des extrémités du diamètre CD, on a deux branches d'hyperbole dont AB et CD sont les axes.

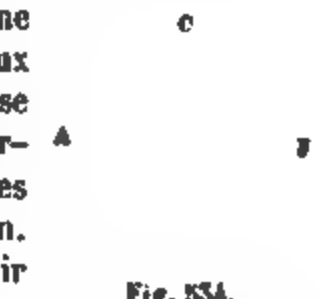


Fig. 534.

682. **Plaques semblables : loi des dimensions homologues.** — Quand on compare les sons donnés par des plaques différentes, on vérifie sans peine la loi suivante, découverte par Chladni : *Pour deux plaques semblables, rendant des sons qui correspondent à des figures nodales semblables, les nombres des vibrations produites dans des temps égaux sont inversement proportionnels aux dimensions homologues.*

Ainsi une plaque circulaire A (*fig.* 531), par exemple, donne l'octave aiguë d'une autre plaque circulaire B de diamètre double, pourvu que les sons de l'une et de l'autre correspondent à la même figure nodale.

683. **Timbres et cloches.** — Les timbres et les cloches, les tam-tams, etc., se subdivisent, comme les plaques, en parties vibrantes séparées par des lignes nodales. On peut le démontrer en plaçant dans leur intérieur un liquide, qui reste immobile au contact des nœuds, tandis qu'il est vivement projeté aux ventres de vibrations. Cette expérience réussit très-bien avec un verre à pied A (*fig.* 535) rempli d'eau, dont on

attaque avec un archet l'un des points du bord supérieur; on voit alors le liquide s'agiter vivement dans les intervalles *a*, *c*, *b*, *d*, que laissent entre elles les lignes de repos telles que *fe* et *gh*.

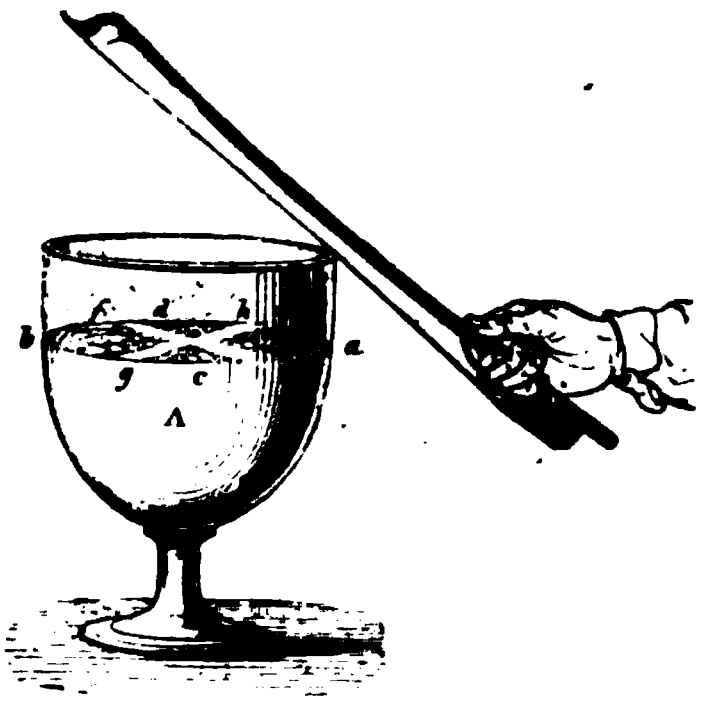


Fig. 535.

684. Vibrations des membranes. — Les membranes flexibles, telles que les peaux que l'on tend sur les tambours, les feuilles de papier collées sur des cadres de bois, rendent des sons quand on les frappe ou qu'on les ébranle d'une manière quelconque. Elles peuvent aussi entrer en mouvement sous l'influence des vibrations qui leur sont transmises par l'air : par exemple, au voisinage d'un timbre vibrant ou d'un tuyau sonore qui rend un son plein et soutenu. Dans tous les cas, le sable répandu à leur surface accuse la formation de lignes nodales, généralement très-compliquées. — Il résulte des expériences de Savart à ce sujet : 1° qu'une même membrane peut vibrer à l'unisson de tous les sons, à partir d'une limite inférieure déterminée; 2° que, pour chaque son, elle se subdivise d'une manière particulière; 3° que, pour un même son, il peut exister plusieurs sortes de divisions.

Nous verrons plus loin comment ces propriétés des membranes trouvent leur application dans la transmission des sons à la membrane du tympan.

CHAPITRE V

DU TIMBRE ET DE L'AUDITION

I. — NOTIONS SUR LE TIMBRE ET SUR LE RENFORCEMENT DES SONS

685. **Du timbre.** — On comprend sous la dénomination générale de *timbre*, ainsi qu'il a été dit plus haut (643), l'ensemble des qualités par lesquelles peuvent se distinguer entre eux des sons de même hauteur et de même intensité. — C'est ainsi qu'une même note musicale, donnée avec la même intensité par un violon, par une flûte, ou par une trompette, possède, dans ces divers cas, des différences de timbre que l'oreille la moins exercée distingue immédiatement.

Les causes de ces différences ont été longtemps mal définies et incomplétement déterminées. C'est surtout aux travaux récents de M. Helmholtz que l'on doit les résultats précis qui sont aujourd'hui acquis à la science. — Nous indiquerons ici les plus importants de ces résultats, après quelques développement préliminaires, indispensables à l'intelligence de la méthode.

686. **Production simultanée de plusieurs sons par une même corde vibrante.** — Il suffit d'une observation attentive pour constater qu'une même corde tendue, fixée à ses deux extrémités, et vibrant transversalement dans toute sa longueur, peut rendre, en même temps que le son fondamental, un ou plusieurs de ses harmoniques.

L'expérience montre alors que la corde, en même temps qu'elle vibre en totalité, se subdivise en un certain nombre de parties, vibrant chacune autour de ses extrémités propres, comme si ces extrémités étaient fixes. Lorsque, par exemple, elle donne simultanément les sons 1 et 2, elle vibre tout d'une pièce comme la corde AB (*fig.* 536) et produit ainsi le son fondamental ; mais, en même temps, elle se partage en deux parties A′C′, C′B′, dont chacune vibre autour de ses extrémités comme une corde de longueur moitié moindre ; ces deux mouvements vibratoires simultanés sont représentés sur la corde A′B′. — De même, quand on entend à la

fois les sons 1 et 3, la corde se subdivise, comme A'B', en trois parties égales qui vibrent à l'unisson, et qui exécutent trois vibrations pendant que la corde tout entière en fait une seule (*).

Fig. 536.

Il est clair que, dans ces trois cas, un même point de la corde met toujours le même intervalle de temps pour passer de l'une de ses positions extrêmes à la position extrême opposée; mais les mouvements exécutés par ce point pendant cet intervalle sont très-différents. — En d'autres termes, la période du mouvement vibratoire, considérée comme limitée par deux positions extrêmes consécutives, est la même dans les trois cas, c'est-à-dire que la *hauteur* du son est la même; l'amplitude peut également être la même, c'est-à-dire que les deux sons peuvent avoir même *intensité;* mais la nature du mouvement exécuté par un point quelconque de la corde est essentiellement différente.

687. **Généralisation de l'observation précédente. — Indication des causes générales du timbre.** — L'observation qui précède n'est pas particulière aux vibrations des cordes : il est très-rare qu'un tuyau, ou un corps sonore quelconque, rende un son déterminé sans qu'on puisse entendre, en même temps, un ou plusieurs autres sons, dans lesquels on reconnait plus ou moins facilement quelques-uns des harmoniques du son fondamental. — Chacun a pu remarquer que, lorsqu'un son complexe, produit d'abord avec une certaine intensité, s'éteint d'une manière graduelle, il arrive que l'on distingue plus facilement tel ou tel harmonique à tel ou tel instant, et que le son subisse alors des modifica-

(*) Les mouvements vibratoires sont toujours de sens contraires, dans deux segments consécutifs de la corde; on le démontrerait en répétant, sur une corde entièrement libre entre ses extrémités, l'expérience de M. Duhamel. (*Note* de la page 386.) — Par là s'explique l'observation suivante de M. Delezenne. Quand on attaque une corde en son milieu, on n'obtient aucun son; c'est que l'archet tend à imprimer aux points situés de part et d'autre du milieu, et très-près de ce point, des vitesses de même sens : ces vitesses ne peuvent se concilier avec la production de l'harmonique 2, et dès lors le développement du son fondamental doit se trouver également empêché. — M. Marloye a généralisé la remarque de M. Delezenne, en montrant qu'on ne peut non plus faire vibrer transversalement la corde en l'attaquant exactement au tiers, au quart, au cinquième de sa longueur. — On conçoit, d'après ces expériences, que le rang des harmoniques qui se produisent en même temps que le son fondamental dépende de la position particulière du point sur lequel on fait agir l'archet.

tions concomitantes, qui présentent une remarquable analogie avec les différences de timbres.

C'est l'extension de ces remarques qui a conduit M. Helmholtz à considérer toutes les différences de timbres comme dues à la superposition de divers harmoniques avec le son dominant. — La méthode expérimentale qui permet de manifester l'existence de ces harmoniques et d'en déterminer exactement la hauteur est fondée sur le renforcement des sons.

688. **Renforcement des sons.** — Lorsque, au voisinage d'un piano dont on a enlevé les étouffoirs, on fait vibrer l'une des cordes d'un violon, on constate que toutes les cordes du piano qui sont à l'unisson avec cette corde, ou avec l'un de ses harmoniques, entrent en vibration; le son acquiert alors pour l'oreille un renforcement remarquable. — La transmission du mouvement vibratoire s'est ici effectuée par l'air, et comme elle n'a pas eu lieu pour toutes les cordes du piano, on voit que la condition nécessaire et suffisante pour que ce phénomène se produise, est qu'il y ait, entre le son produit directement, et ceux que peuvent donner les corps appelés à jouer le rôle de renforçants, des rapports simples.

La transmission du mouvement vibratoire, dans des circonstances de ce genre, peut être rendue manifeste par bien des expériences. — Supposons, par exemple, que l'on fasse vibrer un vase de verre A (*fig.* 537)

Fig. 537.

avec un archet, et qu'on appuie le doigt à 45 degrés du point frotté *a*, de manière à partager le vase en quatre parties vibrantes *v*, *v*, *v*, *v*, séparées par les nœuds *n*, *n*, *n*, *n*. Si l'on approche de ce vase un autre vase iden-

tique B, contenant un peu d'eau au fond, on verra la surface de l'eau se partager en quatre secteurs égaux, dans lesquels le mouvement vibratoire sera accusé par l'agitation du liquide, et qui seront séparés par quatre lignes nodales où le liquide sera en repos.

C'est le renforcement des sons, dans les instruments de musique, par transmission du mouvement vibratoire aux diverses parties, qui préside à la construction de tous ces instruments : la manière dont sont réalisées les conditions nécessaires pour que le renforcement ait lieu d'une façon uniforme pour toute l'échelle des sons que l'instrument doit rendre, est la qualité essentielle qui distingue les instruments dus aux meilleurs constructeurs.

L'air qui est contenu dans des cavités dont les parois supportent un corps sonore participe lui-même aux vibrations, si les dimensions de ces cavités sont convenables : c'est le principe des caisses sonores qui entrent dans la construction des instruments à cordes. C'est ce qui conduit à fixer souvent les diapasons sur des caisses rectangulaires en bois de palissandre (*fig.* 538) : quand le diapason peut s'enlever à volonté, il est facile de

Fig. 538.

constater, au moment où ses vibrations commencent à s'éteindre, que la caisse sonore peut en rendre le son perceptible, alors même qu'il serait impossible de l'entendre sans ce moyen de renforcement.

Enfin l'expérience permet de constater encore que les colonnes d'air doivent offrir des dimensions déterminées, pour renforcer tel ou tel son. — Un timbre de bronze T (*fig.* 539) étant mis en vibration au moyen d'un

Fig. 539.

archet, on en approche l'ouverture d'un tuyau A, fermé à son autre extrémité par un piston mobile : en faisant mouvoir avec la main ce piston, pendant que durent les vibrations du timbre, on constate que le renforcement présente une intensité très-variable avec la position du piston, c'est-à-dire avec la longueur du tuyau.

689. **Emploi des résonnateurs pour l'analyse des sons composés.** — D'après les résultats qui précèdent, on se rend facilement compte du fait suivant, observé dans diverses circonstances, et dont M. Helmholtz a tiré parti pour analyser les sons composés.

Lorsqu'il se produit simultanément, dans un même lieu, un certain nombre de sons divers, et qu'on approche l'oreille d'un tuyau placé dans ce lieu, il arrive parfois qu'on entend certains de ces sons prendre une intensité remarquable : on constate alors que ces sons correspondent précisément au son fondamental du tuyau, ou à l'un des premiers harmoniques. — Dès lors, pour faire l'analyse de sons supposés complexes, M. Helmholtz a imaginé d'employer une série de tuyaux, dits *résonnateurs*, de dimensions graduellement décroissantes, de

Fig. 540.

manière que les nombres de vibrations des sons fondamentaux aillent en croissant d'une manière régulière. L'expérience a montré d'ailleurs que la forme la plus favorable à donner aux tuyaux, pour ce genre d'observations, est celle de cavités sphériques S (*fig.* 540), présentant une ouverture AB, et, à l'opposé de cette ouverture, un petit appendice creux MN que l'on introduit dans l'oreille. Pour analyser un son, l'observateur se place de manière à bien l'entendre, et il détermine, en plaçant successivement dans son oreille les divers résonnateurs, quels sont ceux qui lui donnent la sensation d'un renforcement considérable. Il arrive facilement ainsi à connaître les divers sons simples qui entrent dans la composition d'un son complexe.

690. **Résultats relatifs aux timbres des divers instruments ou de la voix.** — La méthode d'analyse par les résonnateurs, appliquée soit aux sons produits par les divers instruments de musique, soit à la voix humaine, parlée ou chantée, a fourni déjà un grand nombre de résultats, dont nous indiquerons seulement les principaux.

1° Les sons *musicaux* donnés par les divers instruments sont en général des sons composés, et les sons simples qui les constituent présentent toujours, avec le plus bas d'entre eux, des rapports commensurables et d'une remarquable simplicité. Ce sont, en général, les harmoniques du son fondamental, pris dans les 6 ou 8 premiers harmoniques seulement. — Dans ce cas, l'oreille ne perçoit généralement qu'un son, le son fondamental : mais elle le perçoit avec un *timbre* qui dépend du nombre, de la hauteur et de l'intensité relative des harmoniques qui sont combinés avec lui. Divers instruments donnant une même note musicale donnent donc le même son fondamental, mais chacun d'eux superpose à ce son tel ou tel groupe d'harmoniques, avec telle ou telle intensité relative ; c'est là ce qui produit les différences de timbres de ces divers instruments.

2° La voix humaine, parlée ou chantée, présente les mêmes différences, d'une personne à une autre, en supposant que toutes deux donnent la même note et sur la même voyelle. — Mais on reconnaît, en outre, que pour une même personne donnant la même note sur des voyelles différentes, les différences dans la constitution du son complexe consistent dans les intensités relatives des harmoniques qui accompagnent le son fondamental. Les différentes voyelles constituent donc des sons qui diffèrent encore entre eux par des différences de timbres.

3° Les *bruits* se distinguent des sons musicaux en ce qu'ils sont formés par la superposition de sons élémentaires qui ne présentent entre eux aucun rapport simple. — Dans ce cas, l'oreille n'éprouve qu'une sensation vague, à laquelle elle ne peut attribuer aucun caractère de hauteur.

691. **Méthode de synthèse des sons composés.** — Les résultats qu'avait fournis l'analyse par les résonnateurs ont été confirmés par une véritable méthode de synthèse, consistant à recomposer des sons complexes, au moyen des divers sons élémentaires qu'on y avait reconnus.

Soit une série de diapasons, au nombre de 10 par exemple, donnant les dix premiers harmoniques du son rendu par le plus grave d'entre eux, et supposons qu'on puisse entretenir indéfiniment le mouvement vibratoire de chacun d'eux, à l'aide d'électro-aimants qui agissent périodiquement par attractions sur leurs branches. Plaçons maintenant, en présence de chaque diapason, un tuyau renforçant que l'on pourra ouvrir plus ou moins, à la volonté de l'expérimentateur, au moyen des touches d'un clavier sur lesquelles on appuiera plus ou moins fortement. Il est clair qu'on pourra ainsi, en faisant vibrer tous les diapasons à la fois, mais en ouvrant de quantités variables tels ou tels tuyaux renforçants, ajouter au son fondamental tels ou tels harmoniques, avec telle ou telle intensité.

L'expérience ainsi faite montre que l'on peut, par ce procédé, modifier à volonté le timbre du son perçu par l'oreille. Elle confirme les résultats fournis par l'analyse sur les différences de timbres des voyelles. — C'est ainsi, par exemple, qu'en renforçant seulement le son du diapason le plus grave, on obtient un son qui a approximativement le timbre de la voyelle *ou* : on le rend plus semblable encore au timbre de cette voyelle en y joignant le 1^er^ et le 2^e^ harmonique. — C'est ainsi encore qu'on obtient le timbre de la voyelle *o* en affaiblissant le son fondamental, et renforçant beaucoup le 3^e^ harmonique, en même temps qu'on donne faiblement le 1^er^, le 2^e^, et le 4^e^; etc.

II. — STRUCTURE ET FONCTIONS DE L'OREILLE

692. **Description des parties principales de l'oreille.** — L'*oreille* est l'organe qui est destiné spécialement à la perception des sons. Nous décrirons, d'une manière succincte, celles de ses parties dont les notions précédentes peuvent faire concevoir le rôle.

L'oreille peut être partagée, chez l'homme, en *oreille externe*, *oreille moyenne* et *oreille interne*.

L'*oreille externe* est une sorte d'entonnoir, destiné à recueillir les ondes sonores, à peu près comme un cornet acoustique. — Ses diverses parties sont faciles à distinguer : le *pavillon de l'oreille* (*fig.* 541, 1) est une lame fibro-cartilagineuse de forme très-irrégulière, qui se continue avec une large excavation ou *conque* (*ibid.*, de 2 à 4), et avec le *conduit auditif externe* (5, 3) qui s'enfonce dans la portion temporale du crâne, un peu en arrière de l'articulation de la mâchoire. — L'oreille externe est séparée de l'oreille moyenne par une cloison, la *membrane du tympan* (*ibid.*, 6).

L'*oreille moyenne* est une cavité pleine d'air, dont la partie la plus importante est la *caisse du tympan* (*fig.* 541, 11), creusée dans cette portion dure et profonde de l'os temporal à laquelle les anatomistes donnent le nom de *rocher;* la caisse communique d'ailleurs avec plusieurs cellules, pratiquées dans l'épaisseur de l'os. De la partie inférieure de cette cavité,

part un conduit long et étroit, la *trompe d'Eustache* (*ibid.*, 12), dont l'autre extrémité vient s'ouvrir à la partie postérieure des fosses nasales,

Fig. 541. — Coupe de l'oreille.

au-dessus du voile du palais. — Dans la paroi osseuse de la caisse, en regard de la membrane du tympan, sont pratiquées deux ouvertures, masquées dans la figure 541, la *fenêtre ovale* et la *fenêtre ronde;* ces ouvertures correspondent aux diverses cavités de l'oreille profonde, et chacune d'elles est occupée par une membrane tendue comme la membrane du tympan. — Enfin, la caisse est traversée par une chaîne continue de quatre osselets, qui sont représentés à part dans la figure 542, le *marteau m*, l'*enclume e*, l'*os lenticulaire l* et l'*étrier g;* le premier os de cette chaîne, le marteau, adhère à la membrane du tympan (*fig.* 541, 8); le dernier, l'étrier, s'adapte exactement par sa base sur la membrane de la fenêtre ovale. Ces quatre os sont articulés entre eux, et unis par des ligaments qui leur permettent de se mouvoir les uns sur les autres : enfin de petits muscles peuvent tendre plus ou moins l'espèce de ressort formé par la série des osselets, et par suite aussi les membranes qu'elle réunit.

Fig. 542. — Osselets de l'oreille.

L'*oreille interne* est formée de plusieurs cavités, de formes assez compliquées, et remplies de liquides : elles sont désignées sous les noms de *vestibule*, de *canaux semi-circulaires* et de *limaçon*. — Le *vestibule* est une cavité de forme ovoïde, séparée seulement de la caisse du tympan

par la membrane de la fenêtre ovale : c'est une sorte de carrefour, servant d'entrée dans les deux autres parties de l'oreille interne, les canaux semi-circulaires au-dessus (*fig.* 541, 13, 14, 15) et le limaçon au-dessous (*ibid.*, 16). — Les *canaux semi-circulaires*, dont le nom même indique suffisamment la forme, sont au nombre de trois, et situés à peu près, comme le montre la figure, dans trois plans perpendiculaires entre eux. Leurs extrémités, qui se renflent en ampoules, communiquent librement avec l'intérieur du vestibule. — Le *limaçon* est une sorte de cône creux, enroulé en spirale, et subdivisé encore en deux cavités secondaires par une cloison longitudinale : sa base communique librement, comme les canaux semi-circulaires, avec l'intérieur du vestibule, et c'est en un point de sa paroi, voisin de la base, qu'est pratiquée la fenêtre ronde, dont la membrane forme une cloison entre la cavité du limaçon et celle de l'oreille moyenne. — Toutes ces cavités sont comme tapissées par des membranes molles, qui ne sont pas immédiatement appliquées sur les parois osseuses, mais flottantes dans les liquides qui remplissent cette partie de l'organe. C'est sur ces membranes que viennent s'épanouir, en subdivisions d'une finesse extrême, les nerfs auditifs qui pénètrent dans le rocher par le *conduit auditif interne* (*fig.* 541, 17).

693. **Fonctions des diverses parties de l'oreille.** — Les vibrations produites dans l'air viennent d'abord frapper le pavillon de l'oreille : les expériences faites par Savart tendent à montrer que cette lame entre en vibration, et que ses mouvements peuvent se communiquer aux parties plus profondes. Cependant, cette portion de l'organe ne paraît pas avoir une grande importance dans la perception des sons, car la perte du pavillon tout entier n'entraîne qu'un léger affaiblissement de l'ouïe. — La conque et le conduit auditif servent à réfléchir les ondes sonores, et à les concentrer sur la membrane du tympan. Une observation bien simple prouve d'ailleurs que c'est, en général, par les vibrations de l'air que se fait la transmission du son, plutôt que par celles des parois mêmes du conduit : chacun sait que l'interposition d'un tampon de ouate dans le conduit auditif rend difficile la perception des sons ; or il est clair qu'on ne paralyse ainsi que les mouvements de l'air contenu dans le conduit, et non pas ceux des parois elles-mêmes.

La membrane du tympan reçoit à la fois les ondes sonores qui se sont propagées directement dans le conduit auditif externe, et celles qui se sont réfléchies sur les parois de ce conduit. Le tympan entre donc en vibration (684); il transmet ce mouvement vibratoire soit à l'air qui remplit l'oreille moyenne, soit à la chaîne des osselets qui unit le tympan à la membrane de la fenêtre ovale. — D'autre part, les expériences de J. Müller ont prouvé que les membranes de petites dimensions vibrent mieux quand elles sont faiblement tendues que si leur tension est trop énergique ; on en peut conclure que la chaîne des osselets, en formant un ressort qui peut se tendre ou se fléchir plus ou moins entre le tympan et la mem-

brane de la fenêtre ovale, a pour objet de graduer la tension des membranes elles-mêmes : en exerçant sur elles une pression assez énergique, elle les empêche de vibrer trop fortement sous l'influence des sons très-intenses; en exerçant une pression modérée, elle leur permet de vibrer facilement sous l'influence des sons plus faibles. — Il faut remarquer enfin que l'air contenu dans l'oreille moyenne est en communication avec l'air extérieur, par l'intermédiaire de la trompe d'Eustache. Il en résulte que la membrane du tympan éprouve la même pression, de la part de l'air, sur ses deux faces. En outre, l'air qui arrive dans la caisse est toujours saturé de vapeur d'eau, et maintient toujours le tympan à un état convenable d'humidité. L'observation a montré que l'obstruction prolongée de la trompe d'Eustache est suivi d'une absorption de l'air par les parois de l'oreille moyenne, et entraîne la surdité.

La membrane de la fenêtre ovale, qui sépare l'oreille moyenne du vestibule, reçoit les vibrations qui lui sont transmises par la chaîne des osselets; la membrane de la fenêtre ronde, qui est placée dans la paroi du limaçon, au voisinage du vestibule, est mise en vibration par l'air contenu dans la caisse du tympan : le mouvement vibratoire est ainsi communiqué au liquide qui remplit les cavités de l'oreille interne. C'est ainsi que le mouvement est transmis aux membranes molles qui flottent au sein des liquides répandus dans les cavités du vestibule, des canaux semi-circulaires et du limaçon : les ramifications des nerfs auditifs qui s'épanouissent sur ces membranes sont donc elles-mêmes ébranlées, et transmettent à l'encéphale l'impression qui constitue la sensation du son. — Quant au rôle affecté à chacune des cavités de l'oreille interne, dans la perception des diverses qualités que notre oreille attribue aux sons, elle a été déjà l'objet d'un grand nombre d'hypothèses. Il règne encore sur ces questions beaucoup d'incertitude : on peut dire cependant que, de toutes ces cavités, c'est le vestibule qui paraît avoir le plus d'importance : quand on étudie comparativement l'oreille chez les divers êtres de la série animale ayant un organe spécial de l'ouïe, on trouve que c'est la seule cavité de l'oreille interne dont l'existence soit constante.

LIVRE CINQUIÈME

OPTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PROPAGATION DE LA LUMIÈRE. PHOTOMÉTRIE

I. — PROPAGATION DE LA LUMIÈRE

694. **Définitions.** — L'*optique* est la partie de la physique qui traite de la *lumière*.

Certains corps sont *lumineux* par eux-mêmes : tels sont le soleil, les étoiles, les corps incandescents. — D'autres ne peuvent impressionner nos yeux que lorsqu'ils sont *éclairés* par un corps lumineux : tels sont, à la température ordinaire, la plupart des objets qui nous entourent ; telles sont aussi la lune, les planètes, qui nous renvoient la lumière du soleil et des autres astres.

On appelle *transparents* ou *diaphanes* les corps, comme l'air, l'eau, le verre, au travers lesquels on peut voir les objets lumineux ou éclairés, et en distinguer nettement la forme. — On nomme *translucides* les corps, comme le papier, le verre dépoli, au travers desquels on n'entrevoit les objets lumineux que d'une manière confuse, sans en pouvoir apprécier la forme. — On nomme enfin corps *opaques*, les corps, comme le bois, les métaux, au travers desquels il est impossible d'apercevoir les objets lumineux.

695. **Hypothèses faites sur la lumière.** — Nous avons vu, en étudiant la production et la transmission du son, que les impressions perçues par l'oreille sont dues à un mouvement vibratoire, produit dans les corps sonores et transmis par l'air jusqu'à la membrane du tympan. On a

cherché à se rendre également compte de l'intermédiaire par lequel l'action des corps lumineux ou éclairés peut se transmettre à l'organe de la vision. Deux hypothèses différentes ont été proposées.

L'*hypothèse de l'émission*, due à Newton, suppose que les corps lumineux envoient, dans toutes les directions, des particules d'une substance très-ténue et impondérable, qui traverse les corps transparents et est arrêtée par les corps opaques. Ces particules, en arrivant à la membrane nerveuse qui tapisse le fond de l'œil, y produirait l'impression lumineuse.

Dans l'*hypothèse des ondulations*, dont l'idée première est due à Descartes, et qui a été établie et développée par Huyghens et par Fresnel, on assimile la propagation de la lumière à celle du son. Un corps lumineux, de même qu'un corps sonore, serait le siége d'un mouvement vibratoire très-rapide, qui se transmettrait jusqu'à l'organe de la vue par l'intermédiaire d'un milieu élastique. Ce milieu ne peut être l'air atmosphérique, car nous apercevons les astres à travers les espaces vides de l'univers ; on admet que c'est un fluide particulier ou *éther*, répandu partout, dans le vide, dans l'air et dans les corps transparents.

Ces deux hypothèses ont divisé les physiciens pendant de longues années; les conséquences déduites de chacune d'elles par le calcul ont été soumises au contrôle de l'expérience. Or, en partant de l'hypothèse des ondulations, les savants modernes ont pu expliquer la plupart des résultats fournis par l'expérience et même en indiquer *a priori* quelques autres, que l'observation a ensuite confirmés. Certains résultats d'expérience sont, au contraire, en opposition avec la théorie Newton, ou impossibles à expliquer dans cette théorie. Aussi, l'hypothèse de l'émission est-elle aujourd'hui généralement abandonnée, et remplacée par celle des ondulations (*).

696. **Propagation rectiligne de la lumière; rayons lumineux.** — *La lumière se transmet d'un point à un autre, dans un milieu homogène, en suivant la ligne droite qui joint ces deux points.* — Suppo-

Fig. 543.

sons un œil placé en B (*fig.* 543), et regardant un point lumineux A; entre B et A, un milieu homogène, de l'air par exemple. Si, en un point

(*) Les phénomènes lumineux que nous aurons à étudier dans ce Traité peuvent être exposés indépendamment de toute théorie ; il nous arrivera néanmoins d'employer quelques expressions qui sont empruntées à l'hypothèse de l'émission et qui ont passé dans le langage habituel ; nous dirons, par exemple, que la lumière *traverse* les corps transparents, qu'elle est *arrêtée* par les corps opaques, etc. La plupart de ces expressions sont également intelligibles dans l'hypothèse des ondulations; elles ont d'ailleurs, par elles-mêmes et abstraction faite de toute théorie, un sens parfaitement déterminé.

quelconque de la ligne droite AB, on interpose un petit écran de carton, l'œil cesse d'apercevoir le point A ; pour toute autre position de l'écran, le point lumineux continue d'être visible. C'est ce résultat qu'on exprime, quand on dit que la lumière se propage de A en B en suivant la ligne droite AB. — De même, lorsque la lumière du soleil pénètre dans une chambre obscure, par une ouverture étroite, la trace qu'elle produit dans l'atmosphère de la chambre, rendue visible par l'éclairement des particules de poussière qui voltigent dans l'air, est toujours rectiligne.

On nomme *rayon lumineux* toute direction rectiligne suivant laquelle la lumière se propage. Toute ligne droite, partant d'un point quelconque d'un corps lumineux, représente donc un rayon.

697. **Problème géométrique des ombres.** — Lorsqu'un corps opaque est éclairé par un corps lumineux, il arrête tous les rayons qui le rencontrent ; derrière le corps opaque, se trouve un espace où ne pénètre aucune lumière, et qu'on nomme l'*ombre portée*. Les limites de l'ombre portée peuvent toujours être déterminées géométriquement, en s'appuyant sur le principe de la propagation rectiligne. — Nous traiterons

Fig. 544.

le problème pour le cas où le corps lumineux et le corps opaque sont sphériques l'un et l'autre.

Soit O (*fig.* 544) la sphère lumineuse, et O′ la sphère opaque. Construisons le cône ASB tangent extérieurement aux deux sphères : un point *m*, situé dans ce cône et derrière la sphère opaque, ne peut recevoir aucun rayon lumineux ; en effet, toute droite joignant le point *m* à un point quelconque de la sphère O rencontrerait la sphère O′ ; au contraire, un point situé en dehors de ce cône peut toujours rece-

voir certains rayons lumineux; donc la surface du cône ASB limite la région de l'ombre portée. Si l'on trace la circonférence *abc*, suivant laquelle ce cône touche la sphère O', on voit que cette circonférence est, sur la surface de cette sphère, la ligne de démarcation de l'ombre et de la lumière.

On peut maintenant se demander si tous les points situés en dehors de l'ombre portée, et placés à égales distances de la sphère lumineuse, sont également éclairés. — Pour résoudre cette question, construisons le cône A'S'B' tangent intérieurement aux deux sphères, et considérons deux points m' et m'', également distants de la sphère O, mais situés, le premier dans l'espace compris entre les deux cônes ASB et A'S'B', le second dans l'espace extérieur aux deux cônes. Si, du point m'' comme sommet, on décrit un cône $pm''n$ qui touche la sphère O suivant une circonférence *rst*, on pourra voir du point m'' tous les points de la sphère qui sont en avant de cette circonférence; le point m'' reçoit donc de la lumière de tous les points de la zone I limitée au plan *rst*. — Si, du point m' comme sommet, on décrit un cône tangent à la sphère lumineuse, la zone limitée par le cercle de contact sera encore égale à la zone I, mais m' ne pourra recevoir de lumière que d'une partie de ses points, car une portion des rayons compris dans le cône rencontre la sphère opaque; cette portion est d'ailleurs d'autant plus grande que le point m' est lui-même plus rapproché de la surface du cône d'ombre ASB. — Ainsi, l'espace compris entre les deux cônes ASB et A'S'B' est moins éclairé que l'espace extérieur, et la lumière qu'il reçoit *va en diminuant à mesure qu'on s'approche de la région de l'ombre portée*; on lui donne le nom de *pénombre*.

Si l'on marque, sur la sphère O', le cercle de contact $a'b'c'$ du cône intérieur, on reconnaît aisément que, des points de la zone comprise entre *abc* et $a'b'c'$, on voit une moindre portion de la sphère lumineuse que des points situés en avant du cercle $a'b'c'$; il y a donc aussi sur la sphère opaque trois régions distinctes : la lumière pure, en avant de $a'b'c'$, l'ombre pure en arrière de *abc*; la pénombre, entre $a'b'c'$ et *abc*.

Nous laisserons au lecteur le soin de discuter le problème des ombres dans le cas où la sphère opaque serait plus petite que la sphère lumineuse, et dans le cas où elle lui serait égale.

698. **Formation des images dans la chambre obscure.** — Le principe de la propagation rectiligne sert aussi à expliquer les images des objets extérieurs qui se forment dans la chambre obscure.

Supposons d'abord que la lumière pénètre dans la chambre par une ouverture circulaire extrêmement petite *o*, pratiquée au volet VV (*fig.* 545). Soit AB un objet extérieur, lumineux ou éclairé, MN un écran disposé dans la chambre, parallèlement au plan de l'ouverture. — Les rayons qui émanent d'un même point de l'objet, du point A, par exemple, et qui pénètrent dans la chambre en passant par l'ouverture O, forment un faisceau conique très-délié, dont le point A est le sommet, et dont les

arêtes s'appuient sur les bords de l'ouverture; ce faisceau est coupé par l'écran MN suivant un cercle. De même, le point B de l'objet donne en B′ un cercle éclairé, et les points compris entre A et B donnent des cercles compris entre A′ et B′. Si donc tous ces cercles sont assez petits pour

Fig. 545.

que chacun d'eux puisse être assimilé à un simple point, on obtient en A′B′, sur l'écran, une image distincte de l'objet AB. — Si l'objet est une figure plane, située dans un plan parallèle à celui de l'écran, l'image est une figure *semblable*, quelle que soit d'ailleurs la forme de la petite ouverture; on voit aussi que les droites AO et BO, menées de deux points de l'objet au centre de l'ouverture, se croisent en ce centre, de sorte que l'image est toujours dans une position *renversée* par rapport à l'objet.

Si OC et OC′ sont les distances de l'ouverture à l'objet et à l'écran, les triangles semblables OAB et OA′B′ donnent

$$A'B' = AB\frac{OC'}{OC};$$

on voit donc que, si l'objet conserve une position fixe et qu'on fasse varier la position de l'écran, les dimensions linéaires de l'image varient *proportionnellement à la distance de l'écran à l'ouverture*.

Si l'ouverture avait un diamètre un peu considérable, chaque point de l'objet donnerait sur l'écran, non plus une très-petite surface éclairée, comparable à un point, mais une surface de dimensions sensibles. Toutes ces surfaces empiétant beaucoup les unes sur les autres, on n'aurait qu'un éclairement confus, et il ne se formerait plus d'image (*).

(*) Toutefois, si la distance de l'objet à l'ouverture est très-considérable, et si, en outre, l'écran est placé suffisamment loin de l'ouverture, le contour de la portion éclairée de l'écran peut encore être indépendant de la forme de l'ouverture. — Supposons que l'objet volumineux soit le soleil; admettons aussi, pour fixer les idées, que l'ouverture du volet soit triangulaire et que les plans de l'écran et de l'ouverture soient perpendiculaires à la direction des rayons lumineux. Les dimensions de l'ouverture étant négligeables par rapport à la distance du soleil à la terre, on doit considérer comme parallèles les droites menées d'un même point du soleil à tous les points de l'ouverture; donc, les rayons lumineux qui, partis d'un point A du bord du

699. **Vitesse de la lumière.** — C'est par l'observation des éclipses des satellites de Jupiter que l'astronome danois Rœmer mesura, vers 1675, la vitesse de propagation de la lumière. — Jupiter et la terre décrivent autour du soleil des orbites que, pour plus de simplicité, nous supposerons circulaires et situées dans un même plan. Autour de Jupiter, se meuvent quatre lunes ou satellites, qui sont éclairés, comme Jupiter lui-même, par la lumière du soleil. Chacun de ces satellites, en accomplissant sa révolution, vient, à un instant déterminé, se plonger dans l'ombre portée par la planète; il s'éclipse alors, jusqu'au moment où il ressort du cône d'ombre. — Si la vitesse de propagation de la lumière était infinie, c'est-à-dire si nous apercevions tous les phénomènes lumineux à l'instant même où ils se produisent, on devrait observer, à toute époque de l'année, le même intervalle de temps entre deux immersions ou entre deux émersions consécutives d'un même satellite. Admettons, au contraire, que la lumière emploie un certain temps à se propager : aux époques où la terre s'éloigne de Jupiter, l'intervalle de temps qui s'écoule entre deux immersions *apparentes* devra surpasser l'intervalle vrai, de tout le temps que la lumière du satellite met à franchir l'*accroissement de distance* de la terre à la planète; un phénomène inverse devra se produire aux époques où la terre se rapproche de Jupiter.

Or l'observation des éclipses du *premier* satellite de Jupiter (celui qui est le plus rapproché de l'astre) a permis à Rœmer de constater, aux diverses époques de l'année, des différences dans les intervalles de deux de ces phénomènes consécutifs. Pour en déduire la vitesse de propagation de la lumière, il restait à connaître avec précision l'intervalle de temps qui s'écoule entre les instants *vrais* de deux immersions ou de deux émersions consécutives du satellite. Cet intervalle a été déterminé par D. Cassini, et trouvé égal à $42^h\ 22^m\ 35^s$ (*). — Représentons donc par S (*fig.* 546) le soleil, par AB l'orbite de la terre et par CD une portion de l'orbite de Jupiter. Supposons qu'on note les instants précis de l'émersion *apparente* du premier satellite, 1° lorsque la terre et Jupiter sont

soleil, traversent l'ouverture, forment un faisceau prismatique, dont la trace sur l'écran est un triangle égal à celui de l'ouverture. Or, chaque point du soleil donne ainsi un triangle éclairé sur l'écran; pour obtenir le contour de la surface formée par l'ensemble de ces triangles, il suffira donc de supposer que le faisceau prismatique parti du point A tourne autour du disque solaire, en s'appuyant toujours sur l'ouverture. Chaque rayon du faisceau décrira, dans ce mouvement, un cône dont l'angle au sommet est de 30 degrés environ; chaque point du triangle équilatéral éclairé qui correspond au point A décrira donc, sur le plan de l'écran, un cercle dont le diamètre augmente avec la distance de l'écran à l'ouverture, et si cette distance est suffisamment grande, l'ensemble de tous ces cercles, ou l'ensemble des positions du triangle, formera lui-même un cercle, quelle que soit la forme de l'ouverture.

(*) Les observations sur lesquelles ont été établis les calculs de D. Cassini ont été faites à une époque où l'on croyait la lumière douée d'une vitesse infinie; mais comme ces observations ont été extrêmement nombreuses et se rapportent à des positions relatives très-différentes de la terre et de Jupiter, les variations produites par les différences des temps nécessaires à la propagation de la lumière se sont éliminées d'elles-mêmes quand on a pris la moyenne des résultats.

respectivement en T et en J; 2° lorsque les deux planètes ont pris des positions T' et J', telles que la droite T'J' passe par le point de la première observation T. Si, de l'intervalle compris entre les deux instants, on retranche autant de fois que possible 42ʰ 22ᵐ 35ˢ, le reste exprimera évidemment le temps que met la lumière à parcourir une distance égale à T'J' — TJ, distance qui, eu égard à la petitesse du mouvement angulaire de Jupiter, est sensiblement égale à TT'.

Fig. 546.

En se fondant sur des considérations de ce genre, Delambre a trouvé que la lumière parcourait le diamètre de l'orbite terrestre en 16ᵐ 26ˢ; d'après ces mesures, le temps qu'elle met à nous venir du soleil serait de 8ᵐ 13ˢ, et la vitesse de propagation de la lumière serait d'environ 77 000 lieues par seconde, ou 308 000 kilomètres.

* 700. On doit à M. Fizeau et à Foucault des procédés qui permettent de déterminer la vitesse de propagation de la lumière, par des mesures effectuées sur des distances de quelques kilomètres, et même sur des distances de quelques mètres. La valeur la plus probable qui résulte de ces expériences est 300 000 kilomètres environ par seconde.

II. — PHOTOMÉTRIE

701. **Intensités relatives des sources lumineuses.** — Deux sources lumineuses ont des *intensités égales* lorsque, placées de la même manière par rapport à une même surface, elles l'éclairent également.

L'intensité d'une source lumineuse B est dite *double*, *triple* de celle d'une source A, quand la source B produit, sur une surface donnée, le même éclairement que deux, trois sources égales à A, agissant simultanément et dans des circonstances identiques. — Nous dirons alors que la source B envoie, dans le même temps, des *quantités de lumière* doubles, triples, etc., de celle qu'envoie la source A.

702. **Intensités d'une même source à différentes distances.** — Lorsqu'on transporte une même surface à différentes distances d'une source de lumière, et que, dans chacune de ses positions, on la place

perpendiculairement à la direction des rayons qu'elle reçoit (*), on observe que l'éclairement diminue à mesure que la distance augmente.

C'est ce dont on peut se rendre compte par le raisonnement suivant : Soit S (*fig.* 547) la source lumineuse : décrivons, de ce point comme centre, avec un rayon SB égal à 1 mètre par exemple, une surface sphérique : elle reçoit toute la lumière émise par la source. Supprimons maintenant cette surface, et décrivons autour du point S une autre surface sphérique, avec un rayon SB′ égal à 2 mètres : elle recevra encore toute la lumière émise par la source, et, comme elle est égale à 4 fois la première, chaque centimètre carré recevra 4 fois moins de lumière. De même, sur une surface sphérique ayant un rayon de 3 mètres, chaque centimètre carré recevrait 9 fois moins de lumière, et ainsi de suite. — Donc :

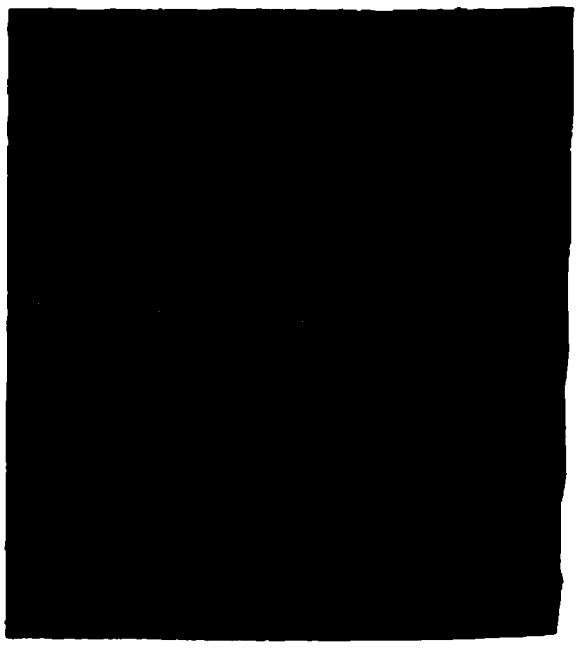


Fig. 547.

Les quantités de lumière reçues normalement, par une surface d'étendue déterminée, sont inversement proportionnelles aux carrés des distances de la surface à la source.

703. **Méthode générale de comparaison des intensités propres de deux lumières.** — Nous appellerons *intensité propre* d'une source lumineuse la quantité de lumière qu'elle envoie sur la surface *prise pour* unité, sur un centimètre carré par exemple, lorsque la distance de la source à cette surface est égale à l'unité de longueur. — Toutes les méthodes expérimentales que nous allons décrire, pour comparer entre elles les intensités propres de diverses sources lumineuses, reposent sur la proposition suivante :

Si deux sources lumineuses, placées à des distances D *et* D′ *d'une même surface, donnent le même éclairement, les intensités propres* I *et* I′ *de ces deux sources sont proportionnelles aux carrés de leurs distances à cette surface.* — En effet, l'intensité propre I de la première source étant la quantité de lumière que reçoit une surface d'un centimètre carré, placée l'unité de distance, la quantité de lumière reçue par cette même surface à la distance D sera $\frac{I}{D^2}$. De même, la quantité de lumière reçue de la seconde source par un centimètre carré, à la distance D′, sera $\frac{I'}{D'^2}$. Si ces deux éclairements sont égaux, on aura :

(*) Cette condition peut toujours être réalisée, si l'on opère avec une surface suffisamment petite.

$$\frac{I}{D^2}=\frac{I'}{D'^2}, \quad \text{d'où l'on tire} \quad \frac{I}{I'}=\frac{D^2}{D'^2}$$

c'est-à-dire que les intensités propres des deux sources sont proportionnelles aux carrés des distances auxquelles il faut placer un petit écran, pour qu'il soit également éclairé par toutes deux (*).

704. **Photomètre de Foucault.** — Le photomètre de Foucault, qui n'est qu'un perfectionnement d'un photomètre imaginé par *Bouguer;* est disposé de manière à permettre de constater avec précision l'égalité d'éclairement de deux surfaces aussi identiques que possible.

Les deux sources lumineuses que l'on veut comparer A, B (*fig.* 548), sont placées d'un même côté d'une lame de porcelaine verticale PQ, assez mince pour être translucide : un écran opaque vertical RS est placé perpendiculairement à cette lame, de manière à la partager en deux parties, qui sont éclairées chacune par l'une des deux sources lumineuses. On règle d'ailleurs la position de cet écran de manière que la partie PN, qui est éclairée par la source B, empiète un peu sur la partie QM qui est éclairée par la source A : on a ainsi une bande MN qui est plus éclairée que chacune des régions voisines, mais on peut la rendre aussi étroite que l'on veut, de manière à comparer les éclairements de ces régions elles-mêmes. — On approche ou l'on éloigne l'une des deux sources jusqu'à ce que les éclairements paraissent rigoureusement égaux, et l'on a alors le rapport des intensités des deux sources en prenant le rapport des carrés de leurs distances à la plaque (703).

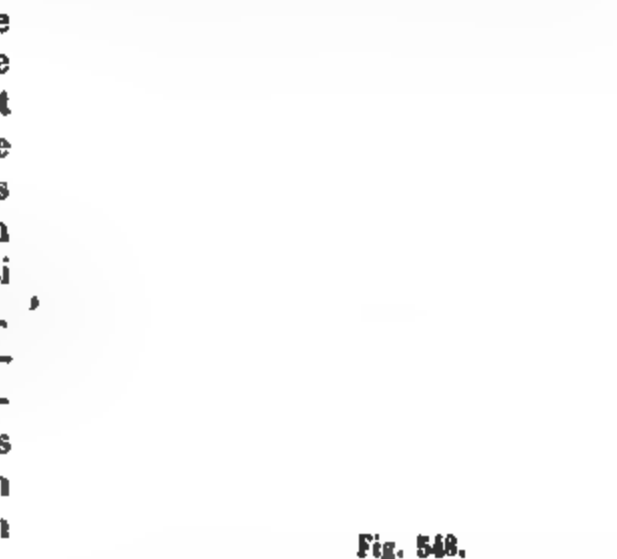


Fig. 548.

705. **Photomètre de Rumford.** — Dans le *photomètre de Rumford*, les deux sources L et B (*fig.* 549) sont placées devant un même écran blanc ; entre elles et l'écran, on dispose une tige de bois verticale A. On obtient alors deux ombres : la première *f*, portée par la source B, ne reçoit de lumière que de la source L ; de même, la seconde *f'*, portée par la source L, ne reçoit de lumière que de B. Si donc on recule la source qui paraît éclairer le plus, ou si l'on rapproche celle qui paraît éclairer le moins, jusqu'à ce que les deux ombres semblent identiques, et si l'on

(*) Le quotient $\frac{I}{D^2}$ est ce qu'on appelle l'*intensité de la source à la distance* D.

mesure alors les distances de chaque source à l'ombre *qu'elle éclaire*, les in-

Fig. 549. — Photomètre de Rumford.

tensités de ces sources seront entre elles comme les carrés de ces *distances*.

706. **Photomètre de M. Wheatstone.** — Une petite perle d'acier *a* (*fig.* 550) est fixée sur un disque de liége noirci *mn*, lequel est fixé *lui*-même sur un pignon mobile autour de son centre. Lorsqu'on fait tourner la manivelle M, ce pignon est entraîné à l'intérieur d'une circonférence dentée, avec laquelle il engrène. La perle d'acier participe alors de deux mouvements à la fois : le mouvement de rotation du pignon autour de son centre, et le mouvement de translation du pignon autour de l'axe de la manivelle. — Supposons qu'on place le photomètre entre les deux sources lumineuses dont on veut comparer les intensités. On voit, sur la perle d'acier au repos, deux points brillants, dus à la réflexion des rayons envoyés par les deux sources; si l'on fait mouvoir la manivelle, les deux points brillants produiront chacun, par la persistance des impressions lumineuses, deux courbes disposées comme celles qu'indique la figure. Si l'une de ces courbes paraît plus brillante que l'autre, on rapprochera peu à peu l'instrument de la source qui produit l'autre courbe, et l'on arrivera à donner la même intensité aux deux traces lumineuses qui sont dues aux deux sources. Il ne restera donc qu'à mesurer les distances des sources au photomètre (703).

Fig. 550. — Photomètre de M. Wheatstone.

CHAPITRE II

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE

I. — PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX

707. **Lois de la réflexion.** — La lumière qui tombe sur une surface polie est, en grande partie, renvoyée en avant de la surface. — Ce phénomène constitue la réflexion de la lumière.

On appelle *plan d'incidence* le plan déterminé par le rayon incident AB (*fig.* 551) et la normale BP menée à la surface réfléchissante MN par le point d'incidence (*); *angle d'incidence*, l'angle ABP formé par le rayon incident et la normale; *angle de réflexion*, l'angle CBP, formé par le rayon réfléchi et la normale. — Le phénomène de la réflexion est soumis aux deux lois suivantes :

1° *Le rayon réfléchi reste dans le plan d'incidence.*

2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

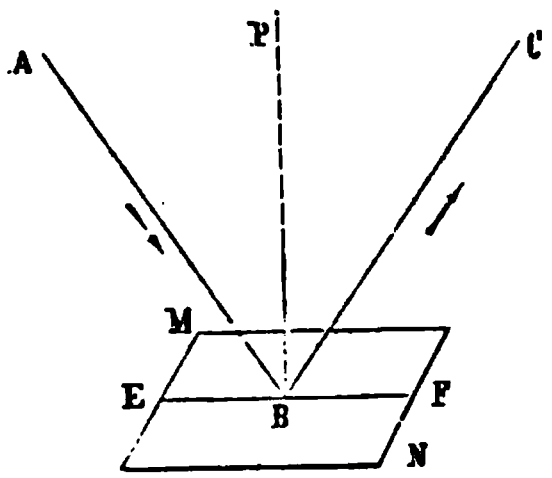


Fig. 551.

708. **Vérifications expérimentales. — Appareil de Silbermann.** — On peut vérifier ces lois au moyen de l'appareil suivant, dû à Silbermann. MN (*fig.* 552) est un cercle divisé, R et S sont deux alidades mobiles autour du centre de ce cercle; chacune d'elles porte, à l'une de ses extrémités, un diaphragme *i*, *i'*, percé en son milieu d'une ouverture étroite; enfin, suivant le diamètre BB', on fixe une règle de laiton qui porte un miroir métallique A, dont le plan est exactement perpendiculaire à ce diamètre. — L'appareil étant placé dans une chambre ob-

(*) Si la surface réfléchissante MN est un plan, la *normale* à cette surface est la perpendiculaire élevée au point d'incidence. Pour une surface courbe, la normale en un point est la perpendiculaire élevée au plan tangent en ce point.

scure où pénètre un faisceau de rayons solaires, on reçoit ce faisceau suivant *ab* sur un petit miroir *m*, que l'on tourne de manière à renvoyer les rayons suivant *bc*, parallèlement au plan du cercle, d'abord sur le diaphragme *i*, puis sur le miroir A. Celui-ci les réfléchit suivant *cd*, et l'on constate qu'en plaçant l'alidade R dans une position symétrique de S par rapport au diamètre BB′, les rayons réfléchis vont sortir par l'ouverture du diaphragme *i*′.

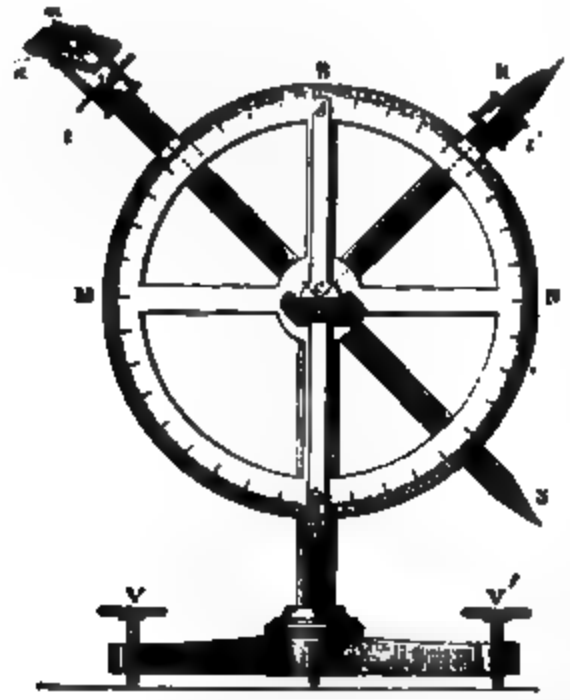


Fig. 552. — Vérification expérimentale des lois de la réflexion.

Cette expérience confirme les lois énoncées : en effet, 1° les rayons incidents *bc* et les rayons réfléchis *cd* déterminent un plan parallèle à celui du cercle gradué, qui contient évidemment la normale au miroir menée par le point d'incidence *c*; 2° les axes des alidades étant symétriquement placés par rapport à ce diamètre BB′, les angles d'incidence et de réflexion *bc*B et B*cd* sont égaux entre eux.

* 709. **Vérification par les observations astronomiques, faites au moyen du bain de mercure.** — La vérification des lois de la réflexion se fait d'une manière plus précise par le procédé suivant. — On dispose une lunette IL (*fig.* 553), mobile sur un cercle divisé vertical, de

Fig. 553.

manière à viser une étoile déterminée, qui se trouve, au moment de l'observation, dans le plan du cercle. En avant de cette lunette, on a placé un bain de mercure, dont la surface brillante MN constitue un miroir horizontal. Si l'on cherche alors à apercevoir l'image de la même étoile par réflexion sur le mercure, on reconnaît qu'il faut amener la lunette dans une position I'L', symétrique de IL par rapport au diamètre horizontal XY.

De là résulte la vérification cherchée. En effet : 1° à cause de la grande distance de la terre à l'étoile, tous les rayons qui nous sont envoyés par celle-ci doivent être considérés comme parallèles à une même direction LI, et par suite le rayon AB, qui s'est réfléchi sur le mercure pour revenir à la lunette, était parallèle à LI ; donc le rayon incident AB et le rayon réfléchi BC, respectivement parallèles à IL et à L'I', déterminent un plan parallèle à celui du cercle divisé; et ce plan, étant vertical, contient la normale BP menée à la surface du mercure par le point d'incidence; 2° l'angle d'incidence ABP et l'angle LCZ sont égaux, comme ayant leurs côtés parallèles et de même sens ; l'angle de réflexion PBC et l'angle ZCI' sont égaux, comme correspondants ; mais, d'après l'expérience, LCZ=ZCI', donc ABP=PBC.

710. **Réflexion à la surface des corps transparents.** — La réflexion peut aussi s'opérer, et suivant les mêmes lois, à la surface des corps *transparents*. Mais ces corps ne réfléchissent, en général, qu'une partie de la lumière incidente; en sorte que, si un faisceau lumineux AB (*fig.* 554) rencontre en B la surface d'une lame de verre, par exemple, une portion de la lumière incidente est réfléchie suivant BC, et une autre portion pénètre dans la lame; l'expérience montre que celle-ci, au lieu de continuer sa route suivant BA', prend une direction telle que BD : c'est le phénomène de la *réfraction*, que nous étudierons dans le chapitre suivant.

Fig. 554.

Un caractère essentiel de la réflexion à la surface des corps transparents, c'est que *la proportion de lumière réfléchie augmente avec l'angle d'incidence*. — Tout le monde a pu remarquer, en effet, qu'une vitre ou une nappe d'eau ne reflète nettement que les objets placés, par rapport à notre œil, de manière que les rayons réfléchis qui lui arrivent soient très-obliques sur la surface réfléchissante.

On peut le vérifier encore en recevant un faisceau de rayons lumineux sur une lame de verre à faces parallèles. On observe que, si la lame est presque perpendiculaire aux rayons incidents, le faisceau réfléchi est très-peu intense, et le faisceau transmis est presque aussi intense que le faisceau incident. Au contraire, si l'angle d'incidence est voisin de 90 de-

grés, c'est le faisceau transmis qui a une intensité presque nulle, tandis que l'intensité du faisceau réfléchi est presque égale à celle du faisceau incident.

711. **Réflexion irrégulière ou diffusion.** — Les surfaces mates, telles que le papier, les murs blancs, etc., au lieu de réfléchir les rayons lumineux dans une direction unique, comme font les surfaces polies, les renvoient dans tous les sens. — Si, dans une chambre complétement obscure, on introduit un faisceau de rayons solaires, et qu'on le fasse tomber sur un miroir métallique sous une inclinaison quelconque, une personne placée dans l'appartement ne reçoit de lumière du miroir que si elle se trouve dans la direction des rayons qu'il réfléchit suivant les lois indiquées. Si, au contraire, le faisceau solaire est reçu sur un mur blanc, la surface éclairée est visible de tous les points de la chambre : la surface du mur renvoie donc des rayons lumineux dans toutes les directions. C'est ce qu'on nomme la *réflexion irrégulière* ou la *diffusion*.

C'est en diffusant les rayons du soleil ou ceux des sources artificielles, que la plupart des objets terrestres nous deviennent visibles : lorsque le temps est couvert, c'est encore la lumière du soleil qui éclaire ces objets, mais elle ne leur parvient qu'après s'être diffusée un grand nombre de fois sur les nuages. — Les miroirs les mieux polis diffusent encore une petite quantité de lumière ; car si, dans une chambre obscure, on reçoit un faisceau de rayons solaires sur un miroir, l'œil peut encore distinguer, le plus ordinairement, en quelque point de la chambre qu'il soit placé, la portion de la surface du miroir sur laquelle tombent les rayons.

II. — MIROIRS PLANS

712. **Diverses espèces de miroirs.** — On donne, en Optique, le nom de *miroir* à toute surface dont l'opacité et le degré de poli sont suffisants pour qu'elle réfléchisse régulièrement presque toute la lumière qui la rencontre.

Au point de vue de la forme de leur surface réfléchissante, on distingue les miroirs en miroirs *plans* et en miroirs *courbes*.

Quant à la nature de la surface réfléchissante, nous supposerons d'abord qu'il s'agisse exclusivement de miroirs métalliques (*).

(*) Au point de vue de la nature de la surface réfléchissante, on distingue les miroirs en miroirs *métalliques* et en miroirs *étamés*.

Les miroirs métalliques sont faits d'une espèce de bronze très-dur, qui peut acquérir un très-beau poli : on les a employés longtemps dans la construction des télescopes. — On emploie maintenant, pour les télescopes, des miroirs dont la surface est formée d'une couche mince d'argent, déposée sur une surface de verre : le travail qui est destiné à donner à cette surface une forme convenable se fait avant l'argenture ; il est beaucoup plus facile que celui des miroirs de bronze.

Les miroirs étamés sont formés d'une lame de verre, à la face *postérieure* de laquelle on a appliqué une couche mince d'amalgame d'étain (*tain* des glaces) ; ce sont ces miroirs qu'on emploie exclusivement dans la décoration des appartements.

713. Un miroir plan donne des images symétriques des objets placés devant la surface réfléchissante. — Considérons d'abord un point lumineux A (*fig.* 555), placé devant un miroir plan : menons par ce point un plan quelconque perpendiculaire au miroir, et prenons ce plan pour plan de la figure : soit MN la ligne suivant laquelle il rencontre le miroir, et AB un rayon incident contenu dans ce plan. La perpendiculaire BP, menée au miroir par le point d'incidence, est contenue dans le plan AMN ; donc, d'après la première loi de la réflexion (707), le rayon réfléchi BC est contenu dans ce même plan ; d'après la seconde loi (*ibid.*) l'angle de réflexion PBC est égal à l'angle d'incidence ABP. — Cela posé, abaissons du point A sur le miroir une perpendiculaire AI, et prolongeons-la derrière le miroir jusqu'à sa rencontre, en A′, avec le prolongement du rayon réfléchi. Il est aisé de voir que les points A et A′ sont symétriquement placés par rapport au miroir ; car les deux triangles AIB et A′IB ont le côté BI commun, les angles AIB et A′IB égaux comme droits, et les angles IBA et IBA′ égaux, puisque le premier est le complément de l'angle d'incidence et que le second est égal au complément de l'angle de réflexion : donc les deux triangles sont égaux, et l'on a AI = A′I. — Or le raisonnement précédent s'applique à un rayon quelconque parti du point A, que ce rayon soit contenu dans le plan AMN, comme le sont les rayons AB, AB′, AB″, ou dans tout autre plan perpendiculaire à la surface du miroir ; donc *les prolongements de tous les rayons réfléchis passent au point A′, symétrique de A par rapport au miroir.* — Or, en général, quand un rayon lumineux arrive à l'œil après avoir subi un ou plusieurs changements de direction, l'impression reçue est toujours celle que produirait un point lumineux, situé quelque part sur le prolongement géométrique de la dernière direction de ce rayon. Dès lors, si l'œil est placé de manière à recevoir un certain nombre de rayons réfléchis par le miroir, ces rayons sembleront partir du point A′, qui appartient à la fois aux prolongements de tous ces rayons et qu'on appelle l'*image* du point A (*).

Fig. 555.

Supposons enfin que, devant un miroir plan, on place un objet lumineux ou éclairé. Les différents points A, D (*fig.* 555), de cet objet auront leurs images respectives aux points A′, D′, symétriquement placés par rapport au miroir ; toute dimension linéaire telle que AD aura

(*) Il en résulte immédiatement que, si l'on fait tomber sur un miroir plan un faisceau de rayons lumineux CD, C′D′, etc., qui *convergent vers un point* A′, situé derrière le miroir, les rayons réfléchis *convergent vers un point* A, *symétrique du premier*, en avant du miroir.

donc pour image une droite A′D′, égale à AD et symétriquement placée. — Il en résulte que, si l'objet est une figure plane, son image sera une figure superposable avec lui; au contraire, si l'objet est un polyédre ou un solide quelconque, il sera en général impossible de le superposer géométriquement avec son image. Ce dernier cas se présente pour l'image d'une personne vue par réflexion dans une glace: le côté droit de l'image est l'image du côté gauche de la personne, et réciproquement.

714. **Images formées par deux miroirs parallèles.** — Soit A (*fig.* 556) un point lumineux placé entre deux miroirs parallèles, et *o* la position de l'œil; par les points A et *o*, menons un plan perpendiculaire aux deux miroirs, et prenons ce plan pour plan de la figure: soit BB′ et CC′ les droites suivant lesquelles il coupe les miroirs. — L'observation montre que l'œil aperçoit, derrière BB′ une série d'images du point A en *a*, *a′*, *a″*, etc.; et derrière CC′, une série d'images *α*, *α′*, *α″*, etc., du même point : il est facile d'expliquer la formation de toutes ces images.

Et d'abord, les rayons qui arrivent à l'œil après avoir subi une seule réflexion, sur l'un ou sur l'autre miroir, donnent naissance aux images *a* et *α*, symétriques de A par rapport à BB′ et à CC′.

Pour rendre compte des autres images, il faut considérer des rayons qui n'arrivent à l'œil qu'après avoir subi plusieurs réflexions. — Tous les rayons qui se sont réfléchis une première fois sur le miroir BB′, se comportent *comme s'ils émanaient du point a*, symétrique de A par rapport à BB′ (713); si donc, avant d'arriver à l'œil, ils se réfléchissent une seconde fois sur le miroir CC′, leurs prolongements, après cette réflexion, iront concourir au point *α′* symétrique de *a* par rapport à CC′; ce point *α′* sera donc encore une image du point A (*). — On raisonnerait de même pour le point *a′*, symétrique de *α* par rapport au miroir BB′, et formé par les rayons qui ont été réfléchis une première fois sur CC′ et une seconde fois sur BB′. — Des considérations analogues permettent de rendre compte

Fig. 556.

(*) Il est d'ailleurs facile de construire la marche de l'un des rayons qui produisent dans l'œil la sensation de cette image; il suffit, pour cela, de joindre un point *o* de l'œil au point *α′* : on a ainsi la direction *no* de l'un des rayons qui arrivent à l'œil; on joint ensuite *na*, puis *mA*, et la marche suivie par le rayon lumineux est *Amno*. — Une construction semblable donnerait la marche des rayons qui concourent à la formation des autres images.

des images α'' et a'', dues à des rayons qui ont subi trois réflexions alternatives sur les deux miroirs, et ainsi de suite.

Il est facile maintenant de généraliser ces résultats; si l'on désigne par d et d' les distances AI et AII du point A aux deux miroirs, on verra que les distances successives de ce point aux images a, a', a'', etc., sont respectivement égales à :

$$2d, \quad 2d+2d', \quad 4d+2d', \quad 4d+4d', \quad 6d+4d', \text{ etc.};$$

de même, les distances du point A aux images α, α', α'', etc., sont :

$$2d', \quad 2d'+2d, \quad 4d'+2d, \quad 4d'+4d, \quad 6d'+4d, \text{ etc.};$$

les distances des images consécutives sont donc successivement égales à $2d$ et à $2d'$.

715. **Images multiples formées par les miroirs étamés.** — Les miroirs étamés diffèrent des miroirs métalliques en ce qu'ils présentent réellement deux surfaces capables de réfléchir la lumière, savoir la surface libre du verre, et le *tain* qui est appliqué sur l'autre surface; aussi donnent-ils toujours des images multiples des objets placés devant eux.

Soit BB′ et CC′ (*fig.* 557) les intersections des deux faces d'un miroir plan étamé, avec un plan mené perpendiculairement à ces deux faces par le point lumineux A et par l'œil placé en O. — Une première image se formera au point a, symétrique de A par rapport à BB′ : elle est due à des rayons tels que Am, réfléchis sur la face libre du verre. — Une deuxième image a' sera formée par des rayons tels que An, qui se réfractent en n et pénètrent dans le verre, puis se réfléchissent en p et se réfractent une deuxième fois en r pour arriver finalement à l'œil suivant rO. — Une troisième image a'' sera due à des rayons tels que A$stqxy$O, réfléchis deux fois sur la face inférieure et une fois sur la face supérieure; et ainsi de suite (*)

Fig. 557.

(*) De ces diverses images, c'est l'image a' qui est la plus brillante, et c'est la seule qui fixe l'attention dans la plupart des cas, surtout quand l'œil est dans le voisinage de la normale Aa. Au contraire, les images secondaires a, a'', etc., acquièrent pour l'œil un éclat presque comparable à celui de a', si l'on se place de manière à recevoir les rayons lumineux très-inclinés sur le miroir : c'est ce qu'il est facile de s'expliquer en se reportant à ce qui a été dit plus haut (710), de l'influence de l'incidence sur les proportions de lumière réfléchie ou réfractée à la surface des corps transparents. — En plaçant, par exemple, une bougie assez près d'une glace étamée un peu épaisse, et

716. **Images formées par deux miroirs inclinés. Kaléidoscope.** — Considérons d'abord deux miroirs perpendiculaires entre eux; soit BD et BC (*fig.* 558) les sections de ces miroirs, par un plan mené perpendiculairement à tous deux par le point lumineux A, plan qui sera celui de la figure. Les rayons qui arriveront à l'œil après une seule réflexion donneront deux images, l'une A' symétrique de A par rapport à BD, l'autre A'' symétrique de A par rapport à BC. — Pour rendre compte des autres images, il faut considérer les rayons qui ont subi plusieurs réflexions alternatives sur les deux miroirs, avant d'arriver à l'œil. — Tous les rayons qui se sont réfléchis une première fois sur le miroir BD se comportent *comme s'ils émanaient du point* A' symétrique de A par rapport à BD (713); si donc ils se réfléchissent une seconde fois sur le miroir BC, leurs prolongements, après cette réflexion, iront concourir au point A''', symétrique de A' par rapport à BC; ce point A''' sera donc encore une image du point A (*) — On établirait de la même manière que les rayons réfléchis d'abord par le miroir BC, puis par le miroir BD, donnent une image située au point symétrique de A'' par rapport au plan du miroir BD; dans le cas que nous considérons, où l'angle DBC est droit, cette dernière image se confond avec A'''. — Il serait d'ailleurs facile de démontrer que, dans ce cas, aucun rayon ne peut éprouver plus de deux réflexions successives, en sorte que le nombre total des images fournies par deux miroirs rectangulaires est de *trois*.

Fig. 558.

En généralisant ces résultats, on trouvera que, si l'angle DBC des miroirs est contenu exactement n fois dans quatre angles droits, le nombre des images est égal à $n - 1$; l'œil, placé dans l'angle des miroirs, aperçoit donc n fois le point lumineux, savoir : une fois directement, et $n - 1$ fois par réflexion. Toutes ces images et le point lumineux lui-même sont situés sur une circonférence, décrite du point B comme centre avec BA comme rayon.

mettant l'œil également au voisinage de la glace, mais assez loin de la bougie, on aperçoit un certain nombre d'images, d'intensités successivement décroissantes.

(*) Pour construire la marche de l'un des rayons qui produisent dans l'œil la sensation de cette image, il suffira de joindre un point p de l'œil au point A'''; on a ainsi la direction np de l'un des rayons qui arrivent à l'œil; on joint ensuite nA', puis mA, et la marche suivie par le rayon lumineux est $Amnp$.

Le *kaléidoscope*, imaginé par Brewster, est fondé sur cette propriété. Deux petits miroirs plans, faisant entre eux un angle de 60 degrés, sont fixés dans un tube cylindrique de carton, de façon qu'ils aient un côté commun, dirigé suivant une des arêtes du cylindre. A l'une de ses extrémités, le tube est fermé par deux plans de verre parallèles, dans l'intervalle desquels on a introduit de petits morceaux de verre coloré. Si l'on place l'œil à l'autre extrémité du tube, on aperçoit, dans six angles consécutifs, la figure formée par les fragments colorés; on voit donc une sorte de rosace hexagonale, dont le dessin varie lorsqu'on change les positions relatives des fragments de verre, en faisant tourner le tube sur lui-même.

III. — MIROIRS SPHÉRIQUES

717. **Miroirs sphériques. — Définitions.** — Une surface courbe peut, en chacun de ses points, être considérée comme se confondant avec le plan tangent mené par ce point. Tout rayon lumineux qui rencontre une surface courbe se réfléchit donc comme il le ferait sur le plan tangent mené au point d'incidence.

Nous nous bornerons à l'étude de la réflexion sur les *miroirs sphériques*. — Ces miroirs sont dits *concaves* ou *convexes*, selon que leur face réfléchissante est la face interne ou externe de la portion de surface sphérique qui les constitue.

Soit C (*fig.* 559) le centre de la sphère dont le miroir fait partie, MN la *base* du miroir, c'est-à-dire le plan du petit cercle qui forme le bord du miroir. La perpendiculaire menée au plan MN par le centre C de la sphère est l'*axe principal du miroir*. Le point O, où l'axe rencontre la surface réfléchissante, est le *pôle* ou le *sommet* du miroir. Enfin, si l'on fait passer par l'axe un plan quelconque, celui de la figure par exemple, ce plan coupe le miroir suivant un arc de grand cercle MON : l'angle formé par les droites CM et CN, menées du centre aux extrémités de l'arc MN, constitue ce qu'on appelle l'*amplitude* du miroir. — Nous supposerons, dans tout ce qui va suivre, que l'amplitude soit toujours d'un petit nombre de degrés, ou, en d'autres termes, que le miroir ne représente qu'une petite portion de la surface de la sphère.

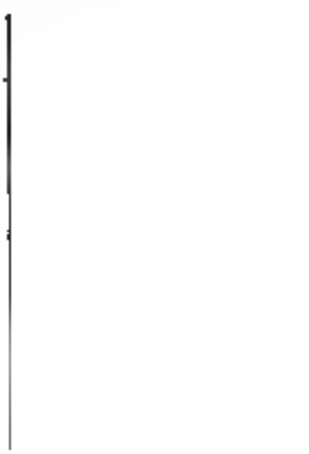


Fig. 559.

718. **Miroirs sphériques concaves. — Foyer principal.** — Soit MON (*fig.* 560) la section d'un miroir sphérique concave, par un plan quelconque mené par l'axe principal; prenons ce plan pour plan de la

figure, et soit RI un rayon lumineux contenu dans ce plan et parallèle à l'axe. Ce rayon rencontre la surface du miroir au point I, où il se réfléchit comme sur le plan tangent. Or le plan tangent à une sphère est perpendiculaire à l'extrémité du rayon passant au point de contact; le rayon IC de la sphère est donc normal à sa surface au point I. Par suite, le plan d'incidence se confond avec le plan de la figure et le rayon réfléchi IF est aussi contenu dans ce plan. — Ce rayon fait d'ailleurs avec la normale un angle de réflexion CIF égal à l'angle d'incidence : soit F le point où il vient rencontrer l'axe principal; l'angle ICF, égal à l'angle d'incidence, est aussi égal à l'angle de réflexion CIF; donc le triangle IFC est isocèle, et FC = FI. Mais, d'autre part, si la distance du rayon RI à l'axe est très-petite par rapport aux distances FO et CO, l'angle en F du triangle IFC diffère très-peu de deux angles droits : on a donc, avec d'autant plus d'approximation que le rayon RI est plus voisin de l'axe,

Fig. 560.

$$IC = IF + FC;$$

et comme IC = OC et que IF = FC on en déduit :

$$FC = \frac{1}{2} OC.$$

Donc le point F, où le rayon réfléchi rencontre l'axe, est *également distant du centre* C *et du sommet* O *du miroir*.

Si le miroir n'a, comme nous l'avons supposé, qu'une très-petite amplitude, tous les rayons parallèles à l'axe qui pourront le rencontrer seront dans les conditions du rayon RI; on voit donc qu'après s'être réfléchis, ils passeront tous au point F' milieu de OC, comme l'indique la figure 561. Ce point prend le nom de *foyer principal* du miroir.

Fig. 561.

Réciproquement, il est évident que, si un point lumineux est placé au foyer principal F d'un miroir, tous les rayons lumineux émis par ce point

sur le miroir seront réfléchis dans une direction parallèle à l'axe principal.

719. **Caustiques par réflexion. — Aberrations de sphéricité.** — Les approximations par lesquelles nous avons déterminé le point où le rayon réfléchi IF (*fig.* 560) vient couper l'axe, cessent d'être applicables aux rayons qui rencontrent le miroir près de ses bords, *lorsque l'amplitude est assez considérable*.

Dans ce cas, on reconnaît facilement que les rayons réfléchis viennent rencontrer l'axe en des points d'autant plus voisins du sommet O que l'incidence a eu lieu plus près du bord. Si donc un semblable miroir reçoit un large faisceau de rayons parallèles à l'axe (*fig.* 562), les intersections successives des rayons réfléchis dessineront, dans un plan passant par l'axe, une courbe lumineuse, formée de deux branches symétriques partant du foyer principal F : cette courbe se nomme une *caustique par réflexion*. — Si maintenant on imagine que le plan de la figure vienne à tourner autour de l'axe du miroir, il s'y forme, dans chacune de ses positions, une caustique identique à la précédente. Le lieu géométrique de toutes ces caustiques est donc une surface de révolution, ayant pour axe l'axe même du miroir : on la nomme *surface caustique*.

Fig. 562.

On voit, d'après ce qui précède, que les rayons infiniment voisins de l'axe sont les seuls qu'on puisse regarder comme passant rigoureusement au foyer principal ; en réalité, la rencontre en ce point de tous les rayons réfléchis n'est jamais qu'approximative, et l'on donne à ce défaut de convergence absolue le nom d'*aberration de sphéricité*. — Il résulte des explications précédentes, que l'aberration de sphéricité est d'autant moindre que l'amplitude du miroir est plus petite (*).

720. **Foyer d'un point situé sur l'axe principal d'un miroir sphérique concave.** — Soit MN (*fig.* 563) la section du miroir par un plan passant par l'axe OC : prenons ce plan pour plan de la figure ; soit P un point lumineux placé sur l'axe et situé, par exemple, au dela du centre. Soit PI un rayon lumineux, situé dans le plan de la figure; joignons le centre C au point d'incidence I, nous aurons ainsi la normale au miroir ; pour construire le rayon réfléchi IP' on remarquera qu'il doit être

(*) Des surfaces lumineuses, analogues à celle dont nous venons de faire concevoir la formation, prennent naissance toutes les fois que des rayons lumineux sont réfléchis sur une surface courbe, de forme quelconque.

dans le plan déterminé par le rayon incident et la normale, c'est-à-dire dans le plan de la figure, et que l'angle de réflexion CIP′ doit être égal à l'angle d'incidence PIC. — Il est facile de voir aussi que le point P′, où le rayon réfléchi rencontre l'axe, est placé entre le centre C et le foyer principal F : car, si le miroir recevait en I un rayon RI parallèle à l'axe, ce rayon se réfléchirait suivant IF; or, l'angle d'incidence PIC étant plus petit que l'angle d'incidence RIC, l'angle de réflexion CIP′ doit être plus petit que l'angle de réflexion CIF; c'est-à-dire que IP′ doit être compris entre IC et IF. — Cela posé, IC étant la bissectrice de l'angle au sommet du triangle PIP′, on a, d'après un théorème connu de la géométrie $\frac{P'I}{PI}=\frac{P'C}{PC}$.

Fig. 563.

Mais, si l'amplitude du miroir est assez petite, on pourra remplacer le rapport $\frac{P'I}{PI}$ par $\frac{P'O}{PO}$, ce qui donne $\frac{P'O}{PO}=\frac{P'C}{PC}$, ou, en intervertissant l'ordre des termes,

$$\frac{P'O}{P'C}=\frac{PO}{PC}. \qquad (1)$$

Cette relation montre que le rapport des deux parties dans lesquelles le point P′ divise le rayon CO du miroir ne dépend que des distances PC et PO, c'est-à-dire de la position particulière du point P sur l'axe du miroir. Donc tous les rayons partis d'un même point P doivent, après réflexion, passer par un même point P′, comme le représente la figure 564.

Fig. 564.

Inversement, il est évident que si le point lumineux était placé en P′, les rayons réfléchis iraient tous passer par le point P. Les deux points P et P′ sont donc *réciproques* l'un de l'autre; on les nomme *foyers conjugués*.

La même construction montre :

1° Que si le point lumineux P s'éloigne du miroir, son foyer P′ s'éloigne du centre C pour s'approcher du foyer principal F ; car, le rayon incident PI (*fig.* 563) se rapprochant alors de RI, le rayon réfléchi IP′ doit se rapprocher de IF ;

2° Que si le point lumineux est situé entre le centre C et le foyer principal F, son foyer, qui est situé au delà du centre, s'en éloigne d'autant plus que le point lumineux s'approche davantage de F. — Enfin, si le point lumineux arrivait exactement au point F, nous avons déjà vu que les rayons réfléchis deviendraient parallèles à l'axe, et il n'y aurait plus, à proprement parler, de foyer.

721. Il reste enfin à examiner le cas où le point lumineux P est situé entre le foyer principal F et le miroir. — Soit PI (*fig.* 565) un rayon incident quelconque, et CI la normale au point I ; si le miroir recevait en I un rayon émané du foyer principal F, ce rayon serait réfléchi parallèlement à l'axe ; le rayon réfléchi actuel IS, qui doit s'écarter davantage de la normale CI, ne peut donc rencontrer l'axe en avant du miroir ; mais le prolongement géométrique IP′ de ce rayon vient couper l'axe en P′, derrière la surface réfléchissante. — On démontrera d'ailleurs, par un raisonnement semblable à celui qui a été fait plus haut, que l'on a sensiblement :

Fig. 565.

$$\frac{\overline{P'O}}{\overline{P'C}} = \frac{\overline{PO}}{\overline{PC}},$$

ce qui montre que la position du point P′ ne dépend que de celle du point P, et non de la direction particulière du rayon PI. Les prolongements géométriques de tous les rayons réfléchis passeront donc tous au même point P′, comme le représente la figure 566. — Le point P′ reçoit encore le nom de foyer du point P ; il faut remarquer que, les rayons lumineux ne passant

Fig. 566.

pas par ce point, il est impossible d'en vérifier la position comme on pouvait le faire dans les cas précédents (718 et 720), au moyen d'un écran. Mais, si l'œil est placé dans la direction des rayons réfléchis, il perçoit ces divers rayons comme s'ils émanaient du point P′, c'est-à-dire qu'il *voit* un point lumineux en P′. Ce point prend alors le nom de *foyer virtuel*. — Par opposition, on appelle *foyers réels* les points par lesquels passent effectivement les rayons lumineux réfléchis dans les deux cas précédents.

Inversement, si l'on recevait sur le miroir des rayons dont les directions allassent concourir au point P′, les rayons réfléchis viendraient converger au point P, en avant de la surface réfléchissante. Les rayons suivraient alors une marche inverse de celle qu'indiquent les flèches. Pour cette raison, on désigne encore le système des deux points P et P′ sous le nom de *foyers conjugués*.

722. **Relation numérique entre les distances focales conjuguées.** — Désignons par p la distance PO du point lumineux au miroir (*fig.* 363), par p' la distance P′O du miroir au foyer conjugué, et par R le rayon de courbure du miroir. En introduisant ces notations dans la relation $\frac{P'O}{P'C}=\frac{PO}{PC}$, dont nous venons de démontrer la généralité, on a :

$$\frac{p'}{R-p'}=\frac{p}{p-R}$$

ou bien, en chassant les dénominateurs, et divisant ensuite tous les termes par le produit $pp'R$,

$$\frac{1}{p'}+\frac{1}{p}=\frac{2}{R}, \qquad (1)$$

relation qui permettra, en général, étant donné un miroir sphérique de rayon R et un point situé à une distance p sur l'axe de ce miroir, de trouver la distance p' du miroir au foyer conjugué, ou réciproquement.

On voit que, si l'on fait $p=\infty$, c'est-à-dire si l'on considère des rayons incidents parallèles à l'axe principal, la formule (1) donne $p'=\frac{R}{2}$: c'est la distance déjà obtenue (718) entre le foyer principal et le miroir. Si donc on désigne par f la distance focale principale, on a $\frac{1}{f}=\frac{2}{R}$ et la relation (1) peut alors s'écrire :

$$\frac{1}{p'}+\frac{1}{p}=\frac{1}{f}. \qquad (1^{bis})$$

En donnant à p diverses valeurs et discutant les valeurs correspondantes de p', on retrouvera tous les résultats que nous avions obtenus par des considérations géométriques.

723. Foyers des points situés en dehors de l'axe principal. — Axes secondaires. — Supposons un point lumineux A (*fig.* 567), situé hors de l'axe principal du miroir, mais à peu de distance de cet axe. Joignons ce point au centre C, et soit B le point où la droite ainsi menée rencontre la surface du miroir. Le miroir offrant, dans les points voisins de B, la même symétrie que dans les points voisins du sommet O, on pourra appliquer à cette droite tout ce qui a été dit de l'axe OC dans les paragraphes précédents; il en résulte que tous les rayons partis d'un point quelconque A de la droite AB se réuniront après réflexion, comme le montre la figure 567, en un même point A′ situé sur cette droite; et que, inversement, des rayons émanés du point A′ iraient concourir au point A. — La droite AB se nomme l'*axe secondaire* du point A, et le point A et A′ sont deux *foyers conjugués* sur cet axe.

Fig. 567.

Cela posé, pour obtenir par une construction géométrique la position du foyer conjugué d'un point donné A, il suffit de construire *un seul* rayon lumineux réfléchi, et de déterminer le point où il coupe l'axe secondaire AB. On choisit, en général, ceux de ces rayons dont la construction est le plus simple à effectuer. — Considérons, par exemple, parmi les rayons incidents, le rayon AI (*fig.* 568) qui est parallèle à l'axe; on sait qu'il vient passer, après réflexion, par le foyer principal F; on trouvera donc le point A′ en prolongeant IF jusqu'à sa rencontre avec AB. — On peut aussi, au lieu du rayon incident parallèle à l'axe principal, employer le rayon incident

Fig. 568.

Fig. 569.

AI' (*fig.* 569), qui passe au foyer principal; ce rayon se réfléchit parallèlement à l'axe principal et coupe alors l'axe secondaire au point cherché (*).

724. **Images des objets placés devant les miroirs sphériques concaves.** — Supposons maintenant qu'un objet de dimensions finies soit placé devant le miroir. — Pour construire l'image de cet objet, il suffira de déterminer, ainsi que nous savons le faire, le foyer conjugué de chacun de ses points. Pour plus de simplicité, nous supposerons l'objet réduit à une ligne droite lumineuse, perpendiculaire à l'axe principal : il est évident que la solution de ce cas particulier permettra de construire l'image d'un objet quelconque.

Fig. 570.

1° Supposons l'objet AB (*fig.* 570) situé *au delà du centre du miroir*. — Pour trouver le foyer conjugué de l'extrémité A, traçons l'axe secondaire AC de ce point, et un rayon parallèle à l'axe principal; ce rayon se réfléchit en passant au foyer principal F, et rencontre le prolongement de AC au point A', qui est l'image du point A. — Déterminons de même l'image B' du point B. Les points intermédiaires entre A et B auront leurs foyers conjugués placés sensiblement sur la droite A'B', ainsi qu'on le vérifierait en cherchant directement ces foyers; la droite A'B' est donc l'image de AB. — On voit, par la construction même, que cette image est *réelle*. — De plus, elle est *renversée* par rapport à l'objet, puisque les axes secondaires des extrémités A et B se croisent en passant par le centre.

Enfin, dans le cas actuel, l'image est *plus petite que l'objet;* en effet, A'B' et AB étant les bases des triangles semblables A'CB' et ACB sont entre eux comme P'C et PC, ou, d'après ce qui a été dit (720), comme P'O et

(*) Sur la figure 567, le point A' a été déterminé à la fois par chacune de ces deux constructions, qui se vérifient mutuellement. — Dans certains cas, il se peut que l'une ou l'autre semble en défaut, tantôt parce que le rayon incident employé pour trouver le foyer conjugué n'existe pas, tantôt parce que ce rayon se trouve intercepté avant sa rencontre avec la surface du miroir : il ne faudrait par pour cela renoncer à ces constructions, qui doivent être regardées comme *purement géométriques*. Les lignes tracées sur la figure, bien que ne représentant plus alors de véritables rayons lumineux, détermineront toujours le point de rencontre des rayons réfléchis par le miroir, c'est-à-dire le foyer conjugué que l'on cherche.

PO; or P'O étant plus petit que PO, il en résulte que l'image A'B' est plus petite que l'objet AB.

Si l'on suppose que l'objet AB se rapproche du centre et prenne une position telle que *ab*, les axes secondaires des extrémités s'écartent l'un de l'autre; or les foyers conjugués des points *a* et *b* sont toujours déterminés par les intersections de ces axes avec les rayons réfléchis qui passent par le foyer principal, rayons qui n'ont pas changé de direction; l'image *a'b'* de *ab* sera donc plus grande que A'B', et plus rapprochée du centre.

Il importe de remarquer que l'image et l'objet sont compris toujours entre deux droites, telles que AA' et BB', qui se croisent au centre; c'est ce qu'on exprime en disant que *l'image et l'objet sont vus du centre du miroir sous des angles égaux*.

2° Supposons l'objet AB (*fig.* 571) *sur la perpendiculaire menée par le*

Fig. 571.

centre à l'axe principal, et, pour plus de clarté dans la figure, plaçons-le tout entier d'un même côté de l'axe. — L'axe secondaire du point A ne rencontrant plus le miroir, déterminons le foyer conjugué de ce point par l'intersection de deux rayons réfléchis, savoir : d'une part, celui qui provient du rayon incident AM parallèle à l'axe principal et qui passe, après réflexion, par le foyer principal F; d'autre part, celui qui provient du rayon incident AF mené par le foyer principal et qui est réfléchi parallèlement à l'axe OC. Il est facile de voir que leur intersection A' est symétrique de A par rapport à l'axe principal (*). — On déterminerait de même le foyer conjugué B' du point B. — Cette construction montre que l'image A'B' est *réelle, renversée, égale à l'objet* et *symétriquement placée par rapport à l'axe principal*.

3° Si l'objet AB est placé *entre le centre et le foyer*, on trouvera, en ré-

(*) On devait s'attendre à trouver le point A' sur le prolongement de la perpendiculaire AC, car cette perpendiculaire est ici l'axe secondaire du point A.

On reconnaîtra facilement aussi que, plus l'objet s'approche du foyer plus cette image grandit, en s'éloignant du miroir.

Fig. 572.

4° Si l'objet AB coupe l'axe principal *au foyer même* (*fig.* 572), l'axe secondaire du point A et le rayon réfléchi IF doivent être considérés comme parallèles, pourvu que l'amplitude du miroir et la distance AF soient très-petites; en effet AI devient alors égal à OF, et par suite à FC; la figure AIFC est donc un parallélogramme, les côtés opposés AI et FC étant égaux et parallèles. Il en résulte que IF, qui, par son intersection avec AC, devrait déterminer le foyer conjugué du point A, ne rencontre AC ni en avant, ni en arrière du miroir. Dans ce cas, il n'y a donc *pas d'image* (*).

5° Supposons enfin que l'objet lumineux AB soit situé *entre le foyer*

Fig. 573.

principal et le miroir (*fig.* 573). En menant encore l'axe secondaire du

(*) En considérant la position que nous venons d'examiner comme la limite des positions que peut prendre l'objet AB lorsqu'il s'approche indéfiniment du foyer

point A, et le rayon AI qui émane de ce point parallèlement à l'axe et se réfléchit suivant IF, on voit qu'on forme un trapèze AIFC dans lequel le côté AI est plus petit que FC, puisqu'il est moindre que OF : le rayon réfléchi IF, prolongé en avant du miroir, ne rencontre donc pas l'axe secondaire du point A. Mais les prolongements géométriques de ces deux directions se rencontrent derrière le miroir, en un point A′ qui est le foyer conjugué *virtuel* du point A. — On déterminerait de même le point B′. — On voit donc que, si l'objet est placé entre le foyer et le miroir, l'image est *virtuelle*, *droite* et *plus grande que l'objet*.

La figure montre enfin que, si l'objet se rapproche du miroir, l'image s'en rapproche en même temps et diminue de grandeur.

* 725. **Relation numérique entre la grandeur de l'image et celle de l'objet.** — Dans l'un quelconque des cas que nous venons d'examiner, considérons les triangles semblables ACB, A′CB′ (*fig.* 570 ou 573), et désignons par o la longueur AB de l'objet, par i la longueur A′B′ de l'image : en représentant toujours les distances OP et OP′ par p et p', et tenant compte du résultat connu $\frac{P'C}{PC}=\frac{P'O}{PO}$, nous aurons

$$\frac{i}{o}=\frac{p'}{p}; \qquad (2)$$

si on joint à cette équation la relation

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$$

on pourra, en éliminant p' entre ces deux équations, obtenir une relation qui donnera la grandeur i de l'image, en fonction de la grandeur o de l'objet et de la distance au miroir. — La discussion de cette relation permettra de retrouver tous les résultats que nous venons d'obtenir par des considérations géométriques.

726. **Vérification expérimentale des résultats qui précèdent.** — Au-devant d'un miroir concave M (*fig.* 574), on dispose une bougie, de manière que le milieu de la flamme P se trouve à peu près sur l'axe du miroir. A l'aide d'un petit écran de papier P′, on cherche le lieu où l'image se forme avec la plus grande netteté.

1° La bougie étant d'abord placée très-loin du miroir, on constate qu'il faut amener l'écran très-près du foyer principal pour recevoir l'image ; cette image est renversée, très-petite et très-brillante. — Si l'on rapproche graduellement la bougie du centre du miroir, il faut aussi rapprocher successivement l'écran de ce point. L'image grandit alors par degrés, mais en restant toujours plus petite que l'objet.

principal, on dit quelquefois que l'image est alors infiniment éloignée du miroir et infiniment grande.

2° Lorsqu'on atteint le centre, en ayant soin d'abaisser suffisamment la flamme au-dessous de l'axe, on peut constater que l'image, toujours

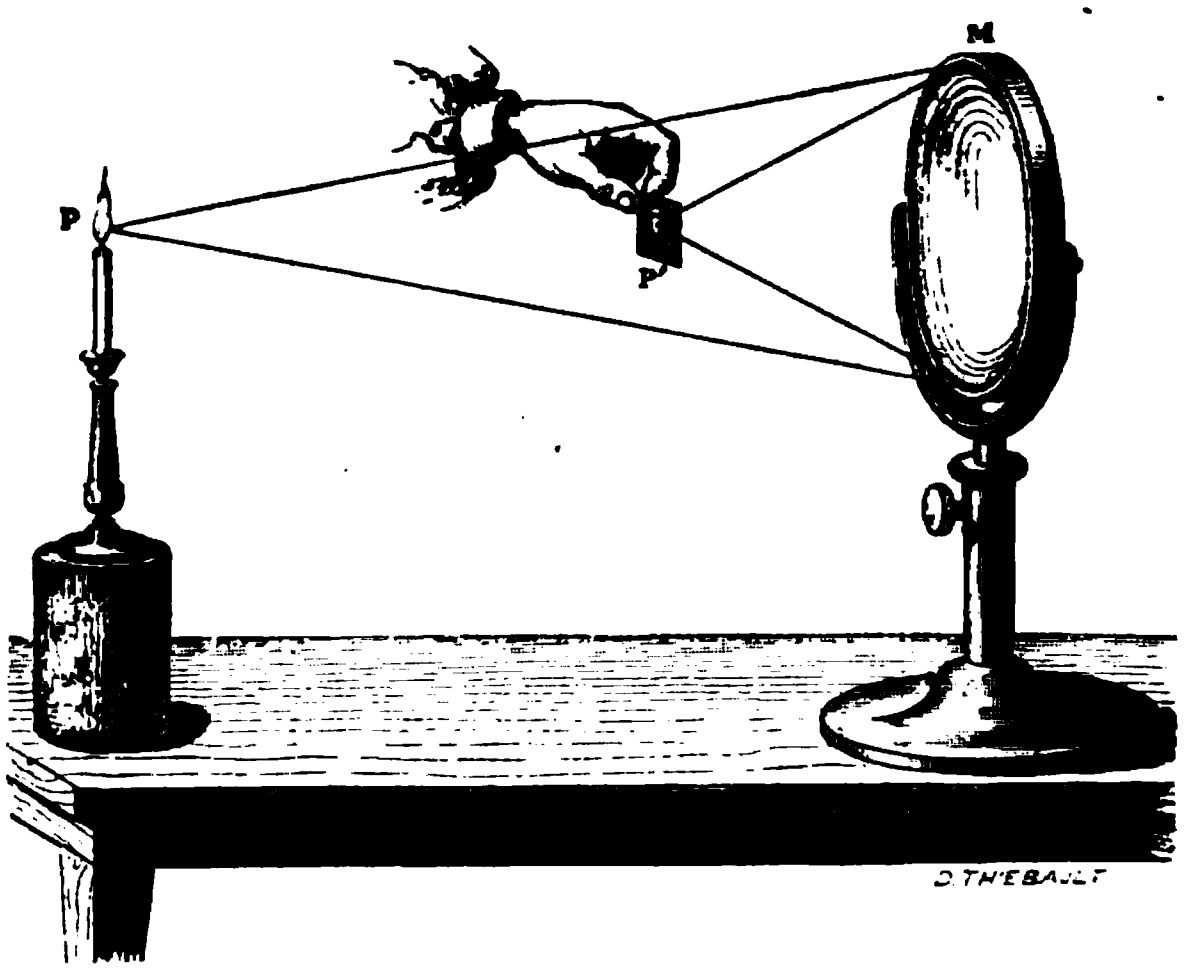


Fig. 574.

renversée, se trouve à la même distance du miroir, et qu'elle est égale en grandeur à l'objet (*).

3° Quand la bougie arrive entre le centre et le foyer principal, on reconnaît que l'image a dépassé le centre; qu'elle est toujours renversée et d'autant plus grande et plus éloignée du miroir que la flamme se rapproche davantage du foyer principal.

4° Quand la bougie atteint le foyer principal, l'image disparaît; les rayons réfléchis par le miroir forment alors un faisceau qui est sensiblement parallèle à l'axe principal, et qui le serait rigoureusement si la flamme se réduisait à un point.

5° Enfin, quand la flamme arrive entre le foyer et le miroir, un observateur placé en avant du miroir voit apparaître derrière la surface réfléchissante une image virtuelle et droite; cette image, très-grande d'abord et très-éloignée, se rapproche et diminue graduellement, à mesure qu'on approche la flamme de la surface du miroir. — Cette expérience explique l'usage qu'on fait quelquefois des miroirs concaves comme *miroirs grossissants*.

(*) On donne quelquefois une autre forme à cette expérience. Au-dessous du centre d'un grand miroir concave, et dans une salle bien éclairée, on suspend un bouquet de fleurs renversé. Les personnes placées à quelque distance, en avant du miroir, aperçoivent alors au-dessus du centre une image aérienne droite de ce bouquet.

tuel. — Soit MON (*fig.* 575) la section d'un miroir sphérique convexe par un plan mené par l'axe principal ; prenons ce plan pour plan de la

Fig. 575.

figure, et considérons un rayon lumineux RI parallèle à l'axe ; ce rayon se réfléchit au point I suivant IS, en restant dans le plan de la figure qui contient le rayon incident RI et la normale CIN, et en faisant un angle de réflexion SIN égal à l'angle d'incidence RIN. La figure montre que le rayon réfléchi IS ne peut rencontrer l'axe principal, mais que son prolongement géométrique rencontre cet axe en un point F situé derrière le miroir ; un raisonnement semblable à celui que nous avons fait pour les miroirs concaves (718) montre que le point F est également éloigné du centre C et du sommet O du miroir, pourvu que le rayon RI soit assez rapproché de l'axe. Si donc l'amplitude du miroir est très-petite, *tout rayon parallèle à l'axe principal se réfléchit de manière que son prolongement géométrique rencontre cet axe à égales distances du centre et du sommet du miroir.* — Le point F ainsi déterminé se nomme le *foyer principal virtuel* du miroir.

728. **Foyers des points situés sur l'axe principal d'un miroir convexe.** — Si l'on considère un rayon PI (*fig.* 575), partant d'un point P situé sur l'axe principal, ce rayon doit se réfléchir suivant une direction IT qui fasse avec la normale un angle TIN plus grand que SIN : le prolongement géométrique du rayon réfléchi rencontrera donc l'axe principal en un point P′ situé entre le foyer principal F et le sommet du miroir. En raisonnant encore comme plus haut (720), on démontre que tout rayon émané du point P, se réfléchit suivant une direction dont le prolongement géométrique passe au point P′, pourvu que l'amplitude du miroir soit très-petite. On en conclut que :

Tout point lumineux situé sur l'axe principal d'un miroir convexe a une

miroir.

Inversement, si l'on fait tomber sur un miroir convexe des rayons convergents, tels que Ti, dont les prolongements géométriques aillent rencontrer l'axe principal en un point virtuel P′ situé entre le foyer principal F et le sommet O, ces rayons se réfléchissent de manière à former un foyer réel P sur l'axe principal; les points P et P′ doivent donc être considérés comme des *foyers conjugués*.

Les distances PO et P′O de ces points à la surface du miroir sont liés par la relation suivante, qu'on établirait par un raisonnement semblable à celui qui a été fait pour les miroirs concaves (720) :

$$\frac{P'O}{P'C} = \frac{PO}{PC}$$

729. **Images formées par les miroirs sphériques convexes.** — Si l'on continue à appliquer aux miroirs convexes les raisonnements qui ont été faits pour les miroirs concaves, on voit que *tout point lumineux situé en dehors de l'axe principal a un foyer conjugué virtuel, situé sur son axe secondaire*, c'est-à-dire sur la droite qui joint ce point lumineux au centre du miroir. Ce foyer conjugué peut donc être obtenu en construisant un seul rayon réfléchi, et en déterminant le point où l'axe secondaire est coupé par ce rayon ou par son prolongement géométrique: nous allons montrer, sur un exemple, comment on construit géométriquement ces images.

Soit AB (*fig.* 576) un objet placé devant un miroir convexe MN. Pour trouver le foyer conjugué du point A, on tracera l'axe secondaire AC de ce point, et un rayon lumineux AI parallèle à l'axe principal : ce rayon

Fig. 576.

se réfléchit suivant une direction IS telle, que son prolongement géométrique passe au foyer principal virtuel F (727). Ce prolongement rencontre l'axe secondaire du point A au point A′, qui est l'image virtuelle du point A. On trouverait, par une construction semblable, l'image B′ du

sensiblement sur la droite A'B', entre A' et B'.

Cette construction montre qu'*un miroir convexe donne toujours une image virtuelle, droite, et diminuée, d'un objet placé devant lui.* — Il est d'ailleurs facile de reconnaître que *cette image est d'autant plus petite et d'autant plus rapprochée du foyer principal, que l'objet est lui-même plus éloigné du miroir* (*).

730. **Détermination expérimentale de la distance focale principale d'un miroir sphérique.** — 1° *Miroir concave.* — On obtient immédiatement la distance focale principale d'un miroir sphérique concave, en orientant ce miroir de façon que son axe principal soit dirigé vers un point lumineux très-éloigné, le centre du soleil, par exemple. On cherche, à l'aide d'un petit écran, l'endroit où l'image se forme avec le plus de netteté ; on a ainsi le foyer principal, dont il ne reste plus qu'à mesurer la distance au sommet du miroir, au moyen d'une règle divisée. — Le double de la distance focale ainsi trouvée est le rayon du miroir.

Fig. 577.

2° *Miroir convexe.* — On dirige encore l'axe principal du miroir vers le soleil, et l'on place, en avant de la surface réfléchissante MN (*fig.* 577), un écran perpendiculaire à l'axe et percé de deux ouvertures A, A'. Ces

(*) En désignant, comme on l'a fait pour les miroirs concaves, par p et p' les distances OP et OP' (*fig.* 575) du miroir à un point et à son image, et par R le rayon de courbure du miroir, la relation $\frac{\overline{P'O}}{\overline{P'C}} = \frac{\overline{PO}}{\overline{PC}}$ donne, en opérant comme plus haut (722),

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{2}{R}. \qquad (1)$$

Si l'on fait $p = \infty$, on trouve $p' = \frac{R}{2}$; ou, en désignant la distance focale principale par f, $\frac{1}{f} = \frac{2}{R}$, ce qui donne la relation

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}. \qquad (1\ bis)$$

On a d'ailleurs toujours, entre la grandeur de l'image et celle de l'objet, la relation

$$\frac{i}{o} = \frac{p'}{p}, \qquad (2)$$

Donc, en éliminant p' entre les relations (1 *bis*) et (2), on obtiendra la valeur de i en fonction de o et de p, et la discussion de ces expressions fournira tous les rapports de grandeur et de position de l'image et de l'objet.

deux ouvertures laissent passer deux faisceaux de rayons solaires AI, A'I' qui tombent sur le miroir et produisent deux faisceaux réfléchis IR, I'R' : ces deux derniers faisceaux vont former sur l'écran deux surfaces éclairées R, R', et l'on rapproche ou l'on écarte cet écran du miroir, jusqu'à ce que la distance des centres de ces petites surfaces soit double de celle des centres des ouvertures A, A'. Lorsque ce résultat est atteint, les prolongements des rayons réfléchis allant toujours passer par le foyer principal virtuel F, on a sensiblement FP = 2FO. Par suite, il suffit de mesurer la distance OP du miroir à l'écran pour avoir la distance focale principale. — Le double de cette distance donnera le rayon du miroir.

CHAPITRE III

RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE

I. — PRINCIPES GÉNÉRAUX

731. **Définitions.** — On appelle *réfraction* la déviation que subissent les rayons lumineux, lorsque, rencontrant obliquement la surface de séparation de deux milieux transparents, ils passent du premier milieu dans le second.

Quand la déviation a pour effet de rapprocher le rayon réfracté de la normale, on dit que le second milieu est *plus réfringent* que le premier. — Quand la déviation a pour effet d'éloigner le rayon lumineux de la normale, on dit que le second milieu est *moins réfringent* que le premier.

On nomme *plan d'incidence* le plan déterminé par le rayon incident et par la normale menée au point d'incidence; *angle d'incidence*, l'angle formé par le rayon incident et la normale; *angle de réfraction*, l'angle formé par le rayon réfléchi et la normale.

732. **Lois de la réfraction.** — La réfraction est soumise aux deux lois suivantes, connues sous le nom de lois de Descartes :

1° *Le rayon réfracté reste dans le plan d'incidence.* — 2° *Le rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle de réfraction est constant pour les mêmes milieux*, quelle que soit la valeur de l'angle d'incidence.

Pour vérifier ces lois par l'expérience, on fixe sur l'appareil de Silbermann (*fig.* 552), au lieu du petit miroir A, une auge cylindrique limitée par des plans de verre (*fig.* 578) et l'on verse de l'eau jusqu'à la hauteur du centre du cercle. Au moyen du petit miroir *m*, on fait arriver un faisceau lumineux qui, passant par une ouverture très-petite pratiquée en *i*, tombe sur la surface de l'eau au centre même du cercle. On fait alors mouvoir la pièce CR, de manière que le faisceau réfracté vienne passer exactement par une petite ouverture pratiquée en *i* — On constate que le rayon réfracté est situé dans le plan d'incidence, qui est parallèle au plan du cercle : la première loi est ainsi vérifiée.

long du support vertical de l'appareil, de façon qu'elle vienne toucher l'extrémité inférieure S de la tige qui porte l'ouverture *i* : la longueur comptée sur cette règle, entre S et le diamètre vertical BB, mesure le sinus de l'angle d'incidence, dans le cercle de rayon CS. On amène ensuite cette même règle en contact avec l'extrémité R de la tige qui porte l'ouverture *r*, et l'on a la mesure du sinus de l'angle de réfraction, dans le même cercle. L'expérience montre que le rapport de ces deux sinus est sensiblement $\frac{4}{3}$. — Si maintenant on effectue des déterminations semblables en faisant varier l'angle d'incidence, on trouve toujours le nombre $\frac{4}{3}$ pour rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle de réfraction.

Fig. 578. — Vérification expérimentale des lois de la réfraction.

735. **Indice de réfraction.** — On appelle *indice de réfraction* d'une substance, par rapport à une autre, le rapport constant n qui existe entre le sinus de l'angle d'incidence i et le sinus de l'angle de réfraction r, pour un rayon lumineux passant de la seconde dans la première. La quantité n est donc définie par la relation.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n$$

D'après l'expérience qui précède, l'indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air est $\frac{4}{3}$. L'indice de réfraction du verre par rapport à l'air est $\frac{3}{2}$, etc. (*).

(*) Lorsqu'on répète ces mêmes expériences en faisant en sorte que la lumière passe, non plus de l'air dans l'eau ou dans le verre, mais *du vide* dans ces mêmes milieux,

734. **Principe du retour inverse des rayons.** — Quand un rayon lumineux traverse une lame de verre à faces parallèles VV′ (*fig.* 579), dont les deux faces sont en contact avec un même milieu homogène, avec l'air par exemple, l'expérience montre que le rayon émergent I′B est parallèle à la direction du rayon incident AI. — De ce résultat expérimental, on peut conclure que, si n est l'indice de réfraction du verre par rapport à l'air, l'indice de réfraction de l'air par rapport au verre est $\frac{1}{n}$. — En effet, menons les normales aux deux surfaces, en I et I′ : on a, en considérant le passage de l'air dans le verre :

Fig. 579.

$$n = \frac{\sin AIN}{\sin PII'}.$$

En considérant maintenant le passage du verre dans l'air, on voit que l'angle d'incidence II′N′ est égal à PII′, puisque ces angles sont alternes-internes ; et que l'angle de réfraction BI′P′ est égal à AIN, puisque ces angles ont leurs côtés parallèles deux à deux et dirigés en sens contraire. Donc on a

$$\frac{\sin II'N}{\sin BI'P'} = \frac{1}{n}.$$

Dès lors, si un rayon lumineux incident AB (*fig.* 580), passant de l'air dans un milieu plus réfringent, tel que l'eau, se réfracte suivant BC, réciproquement un rayon lumineux qui suivrait dans l'eau la route CB prendrait, en passant dans l'air, la direction BA. — Ce principe, qui résulte de l'expérience et dont on fait continuellement usage, est connu sous le nom de principe du *retour inverse* des rayons lumineux.

735. **Angle limite. — Réflexion totale.** — Quel que soit l'angle d'incidence d'un rayon lumineux qui se présente pour passer de l'air dans un milieu plus réfringent, l'expérience montre qu'il pénètre dans ce milieu, et les lois de Descartes permettent de déterminer la direction de rayon réfracté. Par exemple, AB (*fig.* 580) étant un rayon qui se présente

on trouve des nombres qui diffèrent peu des précédents, et qu'on peut appeler indices de réfraction de l'eau ou du verre par rapport au vide ou *indices de réfraction absolus*.

il est aisé de voir qu'on pourra toujours mener, dans le plan d'incidence, une droite BC telle, qu'on ait $\frac{\sin i}{\sin CBN'} = \frac{4}{3}$, c'est-à-dire

$$\sin CBN' = \frac{3}{4} \sin i.$$

On voit en effet que, sin i étant plus petit que l'unité, le second membre est toujours plus petit que l'unité ; il existe donc toujours un angle CBN dont le sinus satisfait à cette condition. — Si maintenant on considère en particulier un rayon incident M'B qui rase la surface du liquide, il fournit, en pénétrant dans l'eau en B, un rayon réfracté BK qui est déterminé par la condition $\frac{\sin 90°}{\sin KBN'} = \frac{4}{3}$, ou bien $\frac{1}{\sin KBN'} = \frac{4}{3}$, ou enfin

$$\sin KBN' = \frac{3}{4}.$$

Cet angle KBN', le plus grand que puissent faire avec la normale les rayons qui pénètrent de l'air dans l'eau, prend le nom d'*angle limite*. — Pour une substance quelconque, c'est l'*angle dont le sinus est égal à l'inverse de l'indice de réfraction*.

Fig. 380.

Or considérons maintenant des rayons lumineux qui se présentent pour passer de l'eau dans l'air. — D'après le principe du *retour inverse* des rayons, un rayon incident CB sortira de l'eau suivant BA ; un rayon incident KB sortira de l'eau en rasant la surface suivant BM'. Mais si un rayon incident RB se présente en faisant avec la normale un angle RBN' plus grand que l'angle limite, ce rayon ne pourra sortir dans l'air : l'expérience montre que, dans ce cas, *il se réfléchit*, c'est-à-dire qu'il prend, dans l'eau, une direction BS telle, que *l'angle de réflexion* N'BS *soit égal à l'angle d'incidence* RBN'. — C'est le phénomène connu sous le nom de *réflexion totale*.

736. **Application des principes de la réfraction. — Déplacement des objets vus par réfraction.** — Quand les rayons émis par un objet subissent, avant d'arriver à notre œil, une ou plusieurs réfractions, cet objet nous apparaît, en général, dans une position différente de

Si l'on place au fond d'un vase V (*fig.* 581) une pièce de monnaie *m*,

Fig. 581.

et qu'on amène l'œil en un point O, d'où l'on commence à ne plus la voir à cause de l'opacité des parois, il suffit de verser de l'eau dans le vase pour que la pièce redevienne visible ; en même temps elle paraît se relever. — Cet effet est dû à ce que des rayons, tels que *mi*, se réfractent à la sortie de l'eau de manière à passer au point O ; l'œil aperçoit alors la pièce de monnaie dans une position telle que *m'*, sur le prolongement de O*i* (*).

De même, un bâton plongé dans l'eau AB (*fig.* 582) paraît brisé au point C, et la partie CB semble relevée vers la surface. C'est que les rayons émanés de chacun des points de cette partie sont déviés par la réfraction, comme le rayon *mi* dans la figure précédente : l'extrémité B doit donc paraître relevée en B', et les points compris entre B et C semblent reportés entre B' et C.

Fig. 582.

737. **Réfractions atmosphériques.** — Des considérations analogues permettent d'expliquer comment, par suite des *réfractions atmosphériques*, nous voyons les astres plus près du zénith qu'ils ne le sont en réalité. — En effet, on peut considérer l'atmosphère comme formée de couches sphériques, limitées par des surfaces qui auraient pour centre le cen-

(*) Si le rayon émergent *i*O est peu incliné sur la surface, le point de cette direction où l'œil aperçoit la pièce de monnaie est sensiblement le point *m'* où la ligne O*i* rencontre la perpendiculaire menée du point *m* à la surface de l'eau. — Il est d'ailleurs toujours nécessaire que les rayons ne soient pas trop inclinés sur la surface, pour que l'image ait quelque netteté.

tre de la terre, la densité de l'air restant constante dans une même couche, mais allant en décroissant à mesure que l'on considère des couches plus éloignées de la surface du sol. Soit alors E*a* (*fig.* 583) un rayon lumineux qui vient d'un astre E. En passant du vide dans la première couche, il éprouve une première réfraction, se dirige suivant *ab*, en se rapprochant de la normale O*a*; en *b*, il se réfracte une seconde fois, et, comme la deuxième couche, plus dense que la première, est aussi plus réfringente, il se rapproche encore de la normale O*b*. En continuant ainsi, on voit que ce rayon éprouve une série de déviations successives, toutes dans le même sens, et qu'il finit par arriver en A, après avoir traversé la dernière couche suivant la direction *d*A. Or l'hypothèse que nous avons faite sur la densité des couches atmosphériques n'est admissible qu'à la condition de supposer à chacune d'elles une épaisseur extrêmement petite; la ligne brisée *abcd* doit donc être regardée comme une courbe continue. Un observateur placé au point A verra l'astre sur le prolongement du dernier élément de cette courbe, c'est-à-dire en un point E′ de la tangente au point A : cette position apparente est évidemment plus rapprochée du zénith Z que la position réelle E.

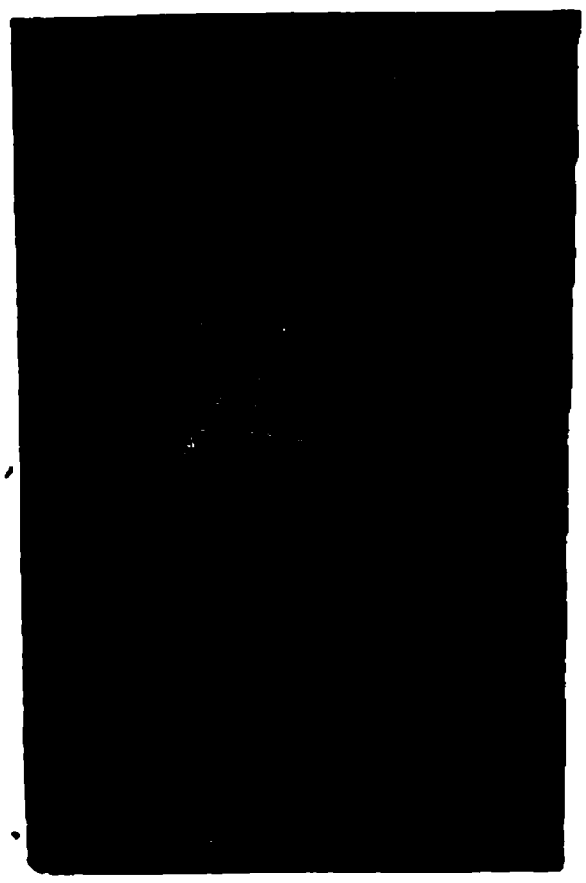


Fig. 583.

738. **Mirage.** — On donne le nom de *mirage* à des apparences trompeuses, observées dans les pays chauds lorsque le temps est calme, et qui font voir les objets lointains renversés, comme s'ils étaient réfléchis par une nappe d'eau. Ce phénomène a été expliqué par Monge, lors de l'expédition faite par la République française en Égypte.

Le sol, chauffé par le soleil, porte à une température très-élevée les couches d'air qui sont en contact immédiat avec lui : celles-ci échauffent lentement les couches qui sont au-dessus d'elles, et si l'air est calme, il peut se former, jusqu'à une certaine hauteur, des couches superposées dont les densités vont en croissant à mesure qu'on s'élève. Supposons que l'œil d'un observateur soit en O (*fig.* 584), et soit P le sommet d'un objet élevé. Parmi les rayons que P envoie vers le sol, on peut concevoir qu'un rayon P*a*, passant successivement d'une couche dans une autre moins dense, se réfracte en s'éloignant toujours de la normale, et tombe enfin en *d*, à la surface de séparation de deux couches de densités différentes, sous un angle plus grand que l'angle limite, de façon à subir la réflexion totale : á partir de ce point, il se relève de plus en plus, et peut revenir vers l'œil de l'observateur. Celui-ci aper-

arrive, en P'.

On a observé le phénomène du mirage dans des conditions assez diver-

Fig. 584.

ses, et parfois un peu différentes de celles que nous venons d'indiquer; les mêmes principes permettent toujours d'en donner l'explication.

II. — RÉFRACTION AU TRAVERS DES PRISMES

739. **Définitions.** — On désigne sous le nom de *prisme*, en optique, un milieu diaphane terminé par deux faces planes inclinées l'une sur l'autre. — L'angle dièdre formé par ces deux plans se nomme l'*angle réfringent* du prisme; l'arête de cet angle est l'*arête réfringente*. La *base* du prisme est la région opposée à l'arête (*).

740. **Réfraction d'un rayon lumineux au travers d'un prisme.** — Dans l'étude que nous ferons des prismes, nous nous bornerons à considérer des rayons incidents contenus dans une *section principale*, c'est-à-dire dans un plan perpendiculaire à l'arête réfringente.

Fig. 585.

Soit ABC (*fig.* 585), une section principale d'un prisme, et soit RI un rayon incident contenu dans le plan de cette section principale, c'est-à-dire dans le plan de la figure; ce plan étant perpendiculaire à chacune

(*) Dans les prismes des cabinets de physique (*fig.* 586), la base est ordinairement limitée par un plan parallèle à l'arête réfringente : le solide transparent présente

dence, cette normale sera contenue dans le plan de la figure. Le rayon incident se réfracte donc sans sortir de ce plan; il se rapproche d'ailleurs de la normale, et prend une direction H′ déterminée par la relation

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n.$$

Si le rayon H′, en arrivant sur la surface BC, fait un angle d'incidence qui lui permette d'émerger (*), il s'écarte de la normale I′N′ et sort du prisme suivant une direction I′S déterminée par la relation

$$\frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{1}{n}$$

On voit donc que, dans les conditions de la figure, *l'effet du prisme est de briser deux fois ce rayon de manière à le ramener vers la base.* — L'expérience confirme cette conséquence des lois de la réfraction. Introduisons, dans une chambre obscure, un faisceau RI de rayons solaires, et recevons ce faisceau sur un écran EE′ (*fig.* 585) : il donnera en R′ une image du soleil. Interposons, sur le trajet des rayons, un prisme dont BAC soit la section principale : l'image solaire disparaît en R′, et se trouve reportée en S, du côté de la base du prisme. — Nous ferons observer, dès à présent, que cette image déviée S n'est plus, comme l'image

alors la forme d'un prisme triangulaire, tel que ceux qu'on définit en géométrie, et l'on peut employer comme angle réfringent l'un quelconque de ses trois angles dièdres latéraux.

(*) Lorsque le rayon lumineux, arrivé à la seconde face du prisme, fait avec la normale à cette face un angle supérieur à l'angle limite (735), il éprouve la réflexion totale et se trouve rejeté vers l'intérieur du prisme sans pouvoir émerger. — Soit RI (*fig.* 587) un rayon incident, qui se réfracte suivant II′; pour que ce rayon puisse émerger en I′, il suffit qu'il fasse, avec la normale au en ce point, un angle inférieur à l'angle limite. Abaissons du point I une droite ID perpendiculaire sur AC, et décrivons autour de cette droite un cône EIE′ dont l'angle générateur EID soit égal à l'angle limite : si le rayon II′ qui traverse le prisme est compris dans ce cône, l'angle II′a

Fig. 586.

Fig. 587.

étant plus petit que EID, ce rayon peut émerger. Au contraire, s'il était extérieur au cône EIE′, il éprouverait la réflexion totale.

perpendiculaire à la section principale; de plus, cette image S est colorée des couleurs de l'arc-en-ciel. Le prisme a donc eu pour effet : 1° de dévier le faisceau incident; 2° de le dilater et de le colorer. — De ces divers effets, nous n'étudierons d'abord que le premier; les autres feront l'objet d'un chapitre spécial.

741. **Influence de la nature du prisme et de la valeur de l'angle réfringent sur la grandeur de la déviation.** — La *déviation* produite par un prisme, c'est-à-dire l'angle SIR' (*fig.* 585) que fait le rayon émergent I'S avec le rayon incident (les deux côtés de cet angle étant dirigés l'un et l'autre dans le sens de la propagation de la lumière), dépend, pour une même incidence, 1° de la nature du prisme; 2° de la valeur de l'angle réfringent. C'est ce que montrent les expériences suivantes :

1° On prend un *polyprisme* (*fig.* 588), formé d'une série de prismes compris entre les mêmes arêtes, mais dont les indices sont différents. Si l'on fait passer le faisceau incident successivement au travers de chacun de ces prismes, on trouve que l'image déviée S est reportée sur l'écran EE' (*fig.* 585) d'autant plus loin de l'image directe R' que le milieu traversé par la lumière est plus réfringent;

Fig. 588.

Fig. 589.

2° Pour montrer l'influence de la valeur de l'angle réfringent, on fait usage du *prisme à angle variable* (*fig.* 589); c'est une auge formée par des plaques métalliques fixes, entre lesquelles peuvent se mouvoir, à frottement dur, autour de deux charnières, deux cadres fermés par des glaces de verre. Si l'on verse de l'eau dans cette auge, la masse liquide représente un prisme dont l'arête réfringente serait déterminée par l'intersection des plans des deux glaces prolongées. En inclinant plus ou moins ces plans l'un par rapport à l'autre, on peut faire varier la grandeur de l'angle réfringent. — Or, si le faisceau lumineux traverse ce prisme, et si, laissant immobile la face d'incidence, on incline de plus en plus la face par laquelle sort la lumière, on trouve que l'image déviée s'éloigne d'autant plus de l'image directe que cette inclinaison est plus considérable (*).

(*) Il est facile également de réaliser avec cet appareil les conditions nécessaires pour qu'il y ait réflexion totale sur la seconde face du prisme. (Voir la Note de la page 648.)

déviation. — Si, dans la chambre obscure, on dispose le prisme P (*fig.* 586) sur le trajet du faisceau lumineux de manière à recevoir le faisceau dévié I'S sur l'écran EE' (*fig.* 585), et si, en tournant le bouton o, on fait varier par degrés insensibles l'angle d'incidence RIN, on observe que, à chacun de ces changements, l'image déviée change de place, et par suite la déviation varie elle-même.

On remarque, en outre, que, pour une certaine position du prisme, c'est-à-dire pour une valeur déterminée de l'angle d'incidence, la déviation est *minimum*, c'est-à-dire moindre que pour toute valeur plus grande ou plus petite du même angle. On constate en effet que, si l'on part de cette position, et qu'on tourne le prisme, soit dans un sens, soit dans l'autre, l'image déviée S s'éloigne toujours davantage de l'image directe R. Enfin, on peut remarquer que le *minimum de déviation* répond au cas où la partie II' du rayon qui traverse le prisme est *également inclinée sur la face d'incidence* AB *et sur la face d'émergence* AC (*).

743. **Déplacement des objets vus à travers les prismes.** — Lorsqu'on regarde un objet à travers un prisme, *cet objet paraît reporté vers le sommet du prisme.* La marche des rayons lumineux permet encore

(*) En admettant ce dernier résultat comme fourni par l'expérience, il est *facile* de trouver une *relation entre la déviation minimum* D, *l'angle réfringent* A *du prisme et l'indice de réfraction* n.

En effet, dans ce cas particulier, le rayon II' (*fig.* 590) étant également incliné sur AB et AC, les angles i et r' sont égaux, de même que les angles r et i' ; or, dans le quadrilatère AIPI', les deux angles en I et en I' étant droits, P est le supplément de A ; d'autre part, dans le triangle PII', P est le supplément de la somme $r + i'$; donc cette somme est égale à A. Donc, puisque $r = i'$, il vient $2r = A$, c'est-à-dire

$$r = \frac{A}{2}.$$

Fig. 590.

D'autre part, l'angle D, extérieur au triangle HII', est égal à la somme des deux angles intérieurs HII' et HI'I ; ces deux angles étant égaux chacun à $i - r$, il vient $D = 2i - 2r$; en remplaçant $2r$ par A, on a donc $D = 2i - A$, ou enfin

$$i = \frac{D + A}{2}.$$

Enfin, on a $n = \frac{\sin i}{\sin r}$, et si l'on remplace les angles i et r par les valeurs que l'on vient de trouver, on aura la relation cherchée :

$$(1) \qquad n = \frac{\sin \frac{D + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}}.$$

Dans le cas particulier où l'angle réfringent du prisme et l'angle d'incidence RIN

parti de P, rencontre un prisme BAC qui le réfracte successivement suivant II′ et suivant I′O; si ce rayon est reçu par l'œil, le point lumineux sera vu sur le prolongement de OI′, c'est-à-dire qu'il paraîtra reporté en P′ vers le sommet du prisme. — Les images ainsi observées sont d'ailleurs, dans la plupart des cas, assez confuses et offrent des contours irisés.

Fig. 594.

744. **Valeurs numériques des indices de réfraction de quelques substances.** — Sans entrer dans le détail des expériences faites pour déterminer les indices de réfraction des diverses substances, nous en réunirons, dans le tableau suivant, les principaux résultats (*).

INDICES DE RÉFRACTION DE QUELQUES SUBSTANCES SOLIDES ET LIQUIDES.

NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES DE RÉFRACTION.
Eau	1,333
Éther	1,358
Alcool	1,365
Crown-glass (verre sans plomb)	1,529
Sel gemme	1,550
Sulfure de carbone	1,678
Diamant	2,180

sont très-petits, on peut substituer aux rapports des sinus les rapports des angles, ce qui donne

$$n = \frac{D + A}{A},$$

d'où l'on déduit :

$$D = (n - 1)\,A,$$

c'est-à-dire que, *pour un prisme ayant un angle réfringent très-petit, et recevant des rayons sous une incidence très-petite, la déviation* D *est proportionnelle à l'angle réfringent.*

(*) La relation (1), qui vient d'être établie (note précédente), savoir :

$$n = \frac{\sin\frac{D + A}{2}}{\sin\frac{A}{2}},$$

conduit au procédé généralement suivi pour mesurer les indices de réfraction. Elle montre, en effet, que l'indice d'une substance pourra être aisément calculé lorsque, après avoir donné à cette substance la forme d'un prisme, on aura déterminé l'angle réfringent A de ce prisme, et la valeur de la déviation minimum.

745. **Définitions.** — On nomme *lentilles sphériques* des masses transparentes terminées par deux surfaces sphériques, ou par une surface sphérique et une surface plane. On les distingue en deux espèces, savoir:

1° Les lentilles à *bords minces*, dont l'épaisseur est croissante depuis les bords jusqu'au milieu. Ces lentilles sont encore désignées sous le nom de lentilles *convergentes*, qui indique leur propriété essentielle.

2° Les lentilles *à bords épais*, dont l'épaisseur diminue depuis les bords jusqu'au milieu : on les désigne encore sous le nom de lentilles *divergentes*.

Les lentilles à *bords minces* comprennent trois variétés, savoir : 1° la lentille *biconvexe*, terminée par deux surfaces sphériques convexes, et dont A (*fig.* 592) représente la section par un plan passant par la ligne des centres des deux faces; 2° la lentille *plan-convexe* B, terminée par une surface convexe et par une surface plane; 3° le *ménisque convergent* C, compris entre deux faces sphériques, l'une convexe, l'autre concave, la face concave étant celle qui a le plus grand rayon.

Fig. 592.

Les lentilles divergentes présentent trois variétés qui correspondent aux précédentes : 1° la lentille *biconcave* D, comprise entre deux surfaces sphériques concaves; 2° la lentille *plan-concave* E, comprise entre une surface sphérique concave et une surface plane; 3° le *ménisque divergent* F, dont la face concave est celle qui a le plus petit rayon.

L'*axe principal* d'une lentille est la droite qui joint les centres des deux faces, si ces faces sont toutes deux sphériques; c'est la perpendiculaire menée du centre de la face sphérique sur la face plane, dans le cas des lentilles plan-convexes et plan-concaves.

746. **Toute lentille à bords minces tend à ramener vers son axe principal les rayons qui la rencontrent.** — Nous prendrons, comme type des lentilles à bords minces, la lentille biconvexe : on étendrait facilement aux deux autres variétés les principes que nous allons établir pour celle-ci.

Soit O et O′ (*fig.* 593) les centres des deux faces, OO′ l'axe principal, et LL′ la section de la lentille par un plan passant par l'axe. Nous supposerons que l'*amplitude* soit très-petite, c'est-à-dire que l'angle formé en joignant l'un des deux centres à deux points opposés du bord, L et L′,

quelconque, situé dans le plan de la figure; ce rayon, passant de l'air dans le verre, se réfracte en se rapprochant de la normale OI menée au point d'incidence. Or cette normale est, comme le rayon incident, située dans le plan de la figure; d'où résulte que le rayon réfracté II′ doit rester dans ce plan. La direction II′ est d'ailleurs déterminée par la relation

Fig. 593.

$$\frac{\sin \text{RIN}}{\sin \text{OII}'} = n,$$

n étant l'indice de réfraction du verre de la lentille. — Enfin, en I′ le rayon subit une nouvelle réfraction, il s'écarte de la normale O′I′N′, en restant dans le plan de la figure, et sa direction est déterminée par la relation

$$\frac{\sin \text{II}'\text{O}'}{\sin \text{N}'\text{I}'\text{S}} = \frac{1}{n}.$$

Ces deux réfractions successives ont évidemment pour effet de ramener le rayon vers l'axe de la lentille (*).

Fig. 594.

747. **Foyer principal des lentilles à bords minces, ou lentilles convergentes.**— Les raisonnements que nous venons de faire sont applicables à un rayon RI (*fig.* 594) parallèle à l'axe principal. Ce rayon doit donc venir couper l'axe en un certain point F. Or l'expérience montre que ce point d'intersection est le même pour tous les rayons parallèles à l'axe, pourvu que l'amplitude de la lentille soit suffisamment petite. — En effet, si l'on reçoit les rayons du soleil sur une lentille de petite amplitude, et qu'on oriente cette lentille de façon que son axe principal soit parallèle aux rayons incidents, on trouve que ces rayons, après

(*) C'est, du reste, ce dont on peut encore se rendre compte en observant que la lentille agit sur le rayon RI comme ferait un prisme de verre dont les faces se confondraient avec les plans tangents menés en I et en I′; la base de ce prisme se trouvant toujours, par suite de la forme même de la lentille, du côté de l'axe principal, le rayon est toujours dévié vers cette région (740).

où ils produisent une image très-petite et très-brillante du soleil. Ce point F a reçu le nom de *foyer principal*; sa distance à la lentille est ce qu'on nomme la *distance focale principale*.

Cette propriété, commune à toutes les lentilles à bords minces, de faire *converger* en un même point les rayons parallèles à leur axe principal, leur a fait donner le nom de *lentilles convergentes*. — La figure 595 montre un faisceau de rayons parallèles traversant la lentille biconvexe LL', et se croisant en son foyer principal F. Pour simplifier le tracé, on a supposé que chaque rayon, au lieu d'éprouver deux réfractions successives, l'une à la face d'entrée et l'autre à la face de sortie, n'en subisse qu'une seule, au point où il rencontre le plan mené par les bords de la lentille. C'est ce que nous ferons dans toutes les constructions du même genre.

Fig. 595.

Réciproquement, si un point lumineux était placé au foyer principal F d'une lentille convergente, les rayons lumineux émanés de ce point seraient réfractés dans une direction parallèle à l'axe principal.

* 748. **Caustiques par réfraction. — Aberration de sphéricité des lentilles.** — Lorsque l'amplitude de la lentille est considérable, il se produit un phénomène analogue à celui que nous avons signalé pour les miroirs sphériques (719) : les rayons très-voisins de l'axe passent seuls au foyer principal; les autres coupent l'axe en des points d'autant plus rapprochés de la lentille que ces rayons sont eux-mêmes plus distants de l'axe principal. Les intersections successives des rayons réfractés déterminent alors, dans le plan de la figure, une courbe lumineuse (*fig.* 596) qu'on nomme *caustique par réfraction*; dans l'espace, une surface lumineuse, dite *surface caustique*, qu'on peut regarder

Fig. 596.

cipal.

On donne à ce défaut de convergence le nom d'*aberration de sphéricité*. — Pour diminuer les effets de l'aberration, dans les instruments d'optique, on couvre les bords des lentilles de diaphragmes annulaires, qui arrêtent les rayons voisins des bords.

749. **Preuves expérimentales de l'existence des foyers conjugués des lentilles convergentes.** – Lorsqu'on place la flamme d'une bougie P (*fig.* 597) devant une lentille convergente L, à une dis-

Fig. 597.

tance plus grande que la distance focale principale, on peut recevoir, sur un écran placé de l'autre côté de la lentille et à une distance convenable, une image P′ réelle de cet objet. Cette expérience montre que chaque point de l'objet a son image en un point correspondant de l'écran; il en résulte que tous les rayons partis d'un même point de la flamme, et qui ont rencontré la lentille, ont été amenés à passer en un même point de l'écran. — On observe, de plus, que l'image est *renversée* par rapport à l'objet, et que, si le milieu de la flamme se trouve sur l'axe principal, le milieu de l'image s'y trouve également.

L'expérience montre donc : 1° qu'un point lumineux situé sur l'axe principal a son image sur cet axe; 2° qu'un point situé au-dessus de l'axe a son image au-dessous, et réciproquement. — Enfin on constate, comme pour les miroirs sphériques, qu'un point lumineux et son image occupent des positions *réciproques* l'une de l'autre; ces deux points sont des *foyers conjugués*.

guées. — Valeur de la distance focale principale. — Le calcul

Fig. 598.

montre que, si l'on désigne par p la distance d'un point lumineux P (*fig.* 598) à une lentille convergente, par p' la distance de son foyer conjugué P′ à la lentille, et par f la distance focale principale CF, on a, entre ces quantités, la relation constante

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f} \qquad (1)$$

Quant à la valeur de la quantité f, si l'on désigne par R et R′ les rayons des deux sphères dont les faces de la lentille font partie, et par n l'indice de réfraction de la substance qui la constitue, on trouve qu'elle est donnée par la relation

$$\frac{1}{f}=\left(n-1\right)\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R'}\right) \qquad (2)$$ (*)

(*) Ces deux relations peuvent s'établir comme il suit. — Soit PI un rayon lumineux parti du point P (*fig.* 599), et qui suit la route PII′P′; soit O et O′ les centres des deux faces de la lentille. Représentons par IA et I′A les traces des plans tangents menés

Fig. 599.

en I et I′; la lentille agira sur le rayon PI comme ferait un prisme de même verre, dont l'angle réfringent serait IAI′. — Or, si I et I′ sont suffisamment voisins de l'axe

La relation (2) montre que les lentilles formées d'une même substance ont une distance focale principale d'autant plus courte que les rayons de courbure de leurs faces sont plus petits.

751. **Centre optique.**—*Dans toute lentille convergente il existe un point, situé sur l'axe principal, et tel que tout rayon que la première réfraction y fait passer sort de la lentille parallèlement à sa direction primitive.* Ce point se nomme le *centre optique.* — Soient O et O′ (*fig.* 600) les centres des deux faces d'une lentille biconvexe : nous démontrerons d'abord que si l'on mène à cette lentille deux plans tangents parallèles, la droite qui joint les points de contact rencontre l'axe principal en un point qui reste le même, quels que soient les deux plans tangents considérés. Soient *mn* et *m′n′* les traces de deux plans parallèles, tangents à la lentille en I et I′; menons la droite II′, et soit C le point où elle rencontre l'axe OO′. Les nor-

pour qu'on puisse prendre, pour mesure des angles aigus de la figure, les sinus de ces angles, la déviation KHP′ a pour valeur (voir la *Note* de la page 650) $KHP' = (n-1)\,IAI'$. Or, si du point A on abaisse sur OO′ la perpendiculaire AC, les deux parties dans lesquelles l'angle IAI′ est divisé sont respectivement égales à IOD et I′O′D′ ; or on a $\sin IOD = \frac{ID}{R}$ et $\sin I'O'D' = \frac{I'D'}{R'}$; si donc on substitue encore aux angles leurs sinus, et si, en raison du peu d'épaisseur de la lentille, on regarde ID comme égal à I′D′, il vient $IAI' = \frac{ID}{R} + \frac{ID}{R'}$; ce qui donne définitivement :

$$(1) \qquad KHP' = (n-1)\,ID\left\{\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right\}.$$

D'autre part, l'angle KHP′ étant extérieur au triangle HPP′, on a :

$$\begin{aligned} KHP' &= IPD + I'P'D' \\ &= \sin IPD + \sin I'P'D' \\ &= \frac{ID}{PI} + \frac{I'D'}{P'I'} \end{aligned}$$

ou, en supposant I′D′ = ID et remplaçant PI par PC ou p, et P′I′ par P′C ou p' :

$$(2) \qquad KHP' = ID\left(\frac{1}{p} + \frac{1}{p'}\right).$$

En égalant ces deux valeurs (1) et (2) de la déviation KHP′, et supprimant le facteur ID, il vient :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = (n-1)\left\{\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right\}.$$

Cette relation montre que la distance p' ne dépend que de la distance p et des rayons R et R′. Donc *tous les rayons lumineux partis du point* P *vont converger au point* P′.

Si maintenant on veut obtenir la distance focale principale, il suffit de faire, dans cette formule, $p = \infty$; la valeur correspondante de p' sera précisément f. On a donc :

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left\{\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right\}$$

et par suite la relation générale entre p et p' peut s'écrire :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

nent :

$$\frac{OI}{O'I'} = \frac{OC}{O'C}$$

d'où

$$\frac{OI - OC}{O'I' - O'C} = \frac{OI}{O'I'}.$$

Mais OI — OC et O'I' — O'C sont les distances du point C aux deux faces de la lentille ; on voit qu'elles sont proportionnelles aux rayons OI et O'I'. Ce résultat est indépendant de la direction particulière des deux plans tangents considérés ; donc le point C a une position constante sur l'axe. Ce point est le *centre optique* de la lentille. — Il est aisé de voir que, réciproquement, si par le centre optique d'une lentille on mène une droite II' quelconque, qui rencontre les faces de la lentille en I et en I', les plans tangents menés en ces points sont parallèles.

Fig. 600.

Supposons maintenant un rayon lumineux RI, qui rencontre la lentille sous une incidence telle, que, après s'être réfracté une première fois, il prenne la direction II' et passe au centre optique : les plans tangents en I et en I' étant parallèles, le rayon sera dans les mêmes conditions que s'il traversait une lame de verre à faces parallèles ; il sortira donc de la lentille suivant une direction I'S, parallèle à sa direction primitive. — Si l'épaisseur de la lentille est négligeable, et si le rayon RI fait un petit angle avec l'axe principal, on pourra, dans la limite des approximations précédentes, regarder le rayon émergent I'S comme se confondant avec le prolongement IR' du rayon incident : il constituera ce qu'on appelle un *rayon sans déviation*.

752. **Axes secondaires — Foyers conjugués sur un axe secondaire.** — Soit C (*fig.* 601) le centre optique d'une lentille convergente LL', et A un point lumineux situé hors de l'axe principal. Menons la droite AC : si l'angle ACO' est suffisamment petit, un rayon lumineux dirigé suivant AC pourra être considéré comme continuant sa route en ligne droite (751) suivant CA' ; mais nous avons admis, comme résultat d'expérience, que tous les rayons émanés du point A et traversant la len-

la droite ACA′, qu'on nomme l'*axe secondaire* du point A. On voit donc que :

Le foyer conjugué d'un point situé hors de l'axe principal, à peu de distance de cet axe, se trouve sur l'axe secondaire de ce point.

Fig. 601.

Cela posé, pour obtenir par une construction géométrique la position du foyer conjugué de A, il suffit de tracer *un seul* rayon réfracté, et de déterminer le point où il rencontre l'axe secondaire. Menons, par exemple, un rayon AI parallèle à l'axe principal (*fig.* 601); ce rayon se réfracte suivant la direction IF qui passe par le foyer principal F ; la rencontre de son prolongement avec l'axe secondaire détermine le point A′, foyer conjugué de A. — Quelquefois il peut être plus commode d'employer, au lieu du rayon précédent, un autre rayon. Soit F′ (*fig.* 602) le foyer principal pour les rayons parallèles à l'axe qui tomberaient sur la face de droite de la lentille ; si l'on mène du point A un rayon incident AF′ qui passe par ce point, ce rayon sortira de la lentille suivant une direction IA′ parallèle à l'axe principal ; la rencontre de IA′ avec l'axe secondaire détermine encore le point A′, foyer conjugué de A (*).

Fig. 602.

753. **Images formées par les lentilles convergentes.** — Soit LL′ (*fig.* 605) la section d'une lentille biconvexe ; soit C le centre optique, F le foyer principal de droite, F′ le foyer principal de gauche. Marquons aussi sur l'axe les deux points H et H′, dont les distances au centre optique sont égales au double de la distance focale principale CF ; ces points joueront un rôle important dans la discussion qui va suivre.

1° Considérons d'abord un objet lumineux AB (*fig.* 603), placé *à une distance de la lentille supérieure au double de la distance focale princi-*

(*) Nous observerons, comme nous l'avons fait pour les miroirs, que ces constructions donnent le foyer conjugué du point A, lors même que le rayon dont on fait usage n'existerait pas en réalité : ce sont des constructions purement géométriques, et, si le rayon AI (*fig.* 601 ou 602) n'existe pas, il en faut conclure uniquement que ce rayon ne concourt pas lui-même à la production de l'image.

conjugué du point A : il s'obtiendra en traçant l'axe secondaire ACA', et en menant, par exemple, le rayon AI parallèle à l'axe principal ; ce rayon se réfracte suivant IF, et rencontre l'axe secondaire en A' (752). On trouverait de même le foyer conjugué B' du point B. Les points de la droite AB auront leurs images aux divers points de la droite A'B', pourvu que A et B ne soient pas trop distants de l'axe principal. — L'image A'B' est donc *réelle*, et l'on voit qu'elle est *renversée* par rapport à AB.

La figure montre, de plus, que, dans le cas actuel, l'image est plus *petite que l'objet* ; en effet, dans les triangles semblables A'AI et A'CF, si

Fig. 603.

l'on remarque que AI est, par hypothèse, plus grand que 2CF, il en résulte que CA est plus grand que CA' ; dès lors, les triangles semblables ACB et A'CB' montrent que l'objet AB est plus grand que l'image A'B'. — Enfin des considérations géométriques analogues permettraient d'établir que CB' est plus grand que CF et plus petit que CH, c'est-à-dire que *l'image est à une distance de la lentille supérieure à la distance focale principale, mais inférieure au double de cette distance.*

Si *l'objet* AB *se rapproche de la lentille, l'image* A'B' *s'en éloigne et grandit : ab* (*fig.* 603) représente le même objet, placé plus près de la lentille ; *a'b'* est l'image qu'il forme dans cette nouvelle position.

On voit enfin que l'image et l'objet sont toujours compris entre les mêmes droites AA' et BB' qui se croisent au centre : c'est-à-dire que l'image et l'objet *sont vus* du centre optique de la lentille *sous le même angle.*

2° Si l'objet AB est placé *à une distance de la lentille égale au double de la distance focale principale*, la même construction montre que *l'image est réelle, renversée et égale en grandeur à l'objet ; l'image et l'objet sont d'ailleurs également distants de la lentille.*

3° Si l'objet AB est placé *à une distance moindre que le double de la distance focale principale*, mais plus grande que la distance focale principale *l'image* A'B', *toujours réelle et renversée, est plus grande que l'objet et est située à une distance de la lentille supérieure au double de la distance focale principale.* — C'est ce qui résulte de ce qu'on vient de voir plus haut, et de la réciprocité de l'image et de l'objet.

plus d'image. En effet, l'axe secondaire AC et le rayon réfracté IF, dont la rencontre doit déterminer le foyer conjugué du point A, sont parallèles, puisque les côtés AI et CF du quadrilatère AICF sont égaux et parallèles. De même, tous les autres rayons émanés du point A sortent de la lentille suivant des directions parallèles à l'axe secondaire de ce point.

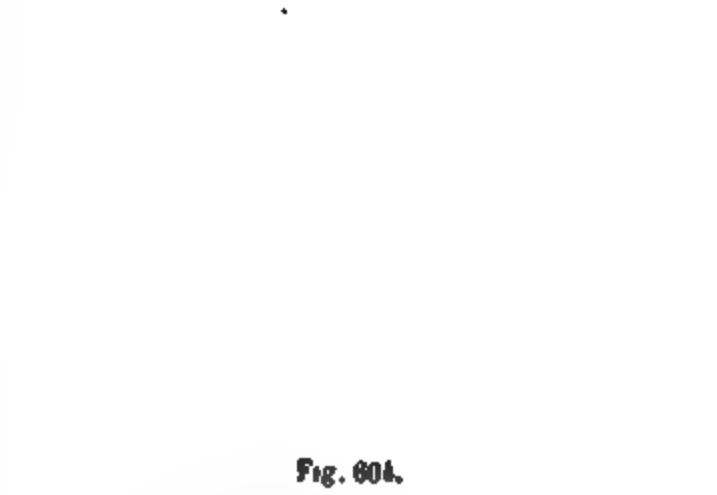


Fig. 604.

5° Supposons enfin l'objet AB (*fig.* 605) placé *entre le foyer principal F' et la lentille.* — La figure AICF est alors un trapèze, dans lequel le côté AI est plus petit que CF : donc les prolongements du rayon réfracté IF et de l'axe secondaire AC se rencontrent à gauche de la lentille en A'. Les rayons émanés de A forment donc, au sortir de la lentille, un faisceau divergent qui semble émaner de A', et si l'œil est placé dans ce faisceau, il aperçoit en A' une image virtuelle du point A. — On trouverait de même l'image virtuelle B' du point B. — Un observateur placé au delà de la lentille voit donc une image *virtuelle, droite et amplifiée de l'objet; cette image est d'ailleurs d'autant plus grande et plus éloignée de la lentille que l'objet est plus rapproché du foyer principal.*

Fig. 605.

Tous les résultats que nous venons d'obtenir, relativement à la position de l'image et à sa grandeur par rapport à celle de l'objet, se vérifient facilement, en plaçant devant une lentille un objet lumineux de dimensions sensibles, par exemple la flamme P d'une bougie (*fig.* 597).

754. **Relation numérique entre la grandeur de l'image et celle de l'objet.** — Dans l'un quelconque des cas que nous venons

ou 605), et si l'on désigne par o la longueur AB de l'objet et par i la longueur correspondante A'B' de l'image, on aura, en représentant toujours les distances CP et CP' par p et p',

$$\frac{i}{o}=\frac{p'}{p}; \tag{3}$$

on a d'ailleurs, comme il a été dit (750), entre p' et p la relation

$$\frac{1}{p'}+\frac{1}{p}=\frac{1}{f};$$

en éliminant p' entre ces deux équations, on obtiendra une relation qui donnera la grandeur i de l'image, connaissant la grandeur o de l'objet et sa distance p à la lentille. — La discussion de cette relation permettra de retrouver tous les résultats que nous venons d'obtenir par des considérations géométriques.

755. **Lentilles à bords épais ou lentilles divergentes.** — Pour ce qui concerne les lentilles à bords épais, nous nous bornerons à en énoncer les propriétés; la théorie est semblable à celle des lentilles à bords minces.

Fig. 606.

1° La figure 606 montre l'action exercée par une lentille biconcave sur un rayon lumineux RI. Ce rayon éprouve une première réfraction qui le dévie suivant II', en le rapprochant de la normale OIN; en I' il subit une deuxième réfraction suivant I'S, et s'éloigne de la normale OI'. Ces deux réfractions contribuent l'une et l'autre à *augmenter la divergence* du rayon lumineux par rapport à l'axe principal. De là le nom de *lentilles divergentes*, donné à toutes les lentilles à bords épais (*).

2° Des rayons incidents parallèles à l'axe principal, tels que RI (*fig.* 607), sortent de la lentille en divergeant suivant une direction telle que IR' leurs prolongements géométriques se rencontrent en un même point F situé sur l'axe, en avant de la lentille; ce point de concours est le *foyer principal virtuel* de la lentille.

3° Des rayons tels que PI (*fig.* 607), émanés d'un point P de l'axe principal, se réfractent suivant des directions telles que IS, dont les prolon-

(*) On peut encore se rendre compte de cette divergence, en observant que la lentille agit sur le rayon RI comme ferait un prisme de verre, dont les faces se confondraient avec les plans tangents menés en I et en I', et dont la base serait du côté opposé à l'axe principal.

lentille. — Le point P′ est dit le *foyer conjugué virtuel* du point P (*).

4° Le foyer conjugué virtuel d'un point A (*fig.* 608) situé hors de l'axe principal se trouve sur l'*axe secondaire* AC. Pour l'obtenir, il suffit de déterminer l'intersection A′ de cet axe secondaire avec le prolongement géométrique de l'un des rayons émergents, par exemple avec le prolongement IF′ du rayon réfracté provenant du rayon AI, émis par le point A parallèlement à l'axe principal.

Fig. 607.

5° *Une lentille divergente* LL′ (*fig.* 608) *donne toujours une image* A′B′ *virtuelle, droite et diminuée, d'un objet* AB *placé devant elle*. Cette image, située entre la lentille et le foyer principal virtuel F′, se rapproche du foyer principal et diminue de grandeur, à mesure que l'objet s'éloigne lui-même de la lentille.

Fig. 608.

* 756. **Relations numériques entre les distances focales conjuguées, et entre les grandeurs de l'image et de l'objet, pour les lentilles divergentes.** — Un calcul tout à fait semblable à celui qui a été indiqué précédemment (*note* de la page 656) montre que les distances focales conjuguées p et p' sont liées, dans les lentilles divergentes, par la relation

$$(1) \qquad \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f},$$

f étant la distance de la lentille au foyer principal virtuel F′ : cette quantité f est encore donnée par la relation

$$(2) \qquad \frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right).$$

(*) Il faut entendre par là que, si la lentille reçoit les rayons tels que SI convergent vers le point P′, ces rayons viendront, après réfraction, passer par le point P.

dimension correspondante de l'objet, on a

$$(3) \qquad \frac{i}{o} = \frac{p'}{p}.$$

Ces trois équations suffisent pour résoudre toutes les questions relatives à la position et à la grandeur de l'image, quand on connaît la position et la grandeur de l'objet, ainsi que la distance focale principale de la lentille.

757. **Détermination de la distance focale principale d'une lentille sphérique.** — Les procédés qu'on emploie pour trouver expérimentalement la distance focale principale d'une lentille sphérique convergente ou divergente, sont semblables à ceux que nous avons fait connaître en traitant des miroirs sphériques (730).

758. **Lentilles annulaires de Fresnel. — Phares.** — Nous avons vu que des rayons parallèles à l'axe principal d'une lentille sphérique ne passent rigoureusement par le foyer que si l'amplitude de la lentille est très-petite (748). Inversement, si l'on place un point lumineux au foyer d'une lentille, il faut que la même condition soit remplie pour que les rayons soient réfractés parallèlement à l'axe principal : si l'*ouverture* de la lentille est trop grande, les rayons réfractés forment un faisceau divergent : par suite, l'intensité de ce faisceau décroît rapidement à mesure que la distance augmente. — On doit à Fresnel des lentilles d'une construction particulière, dites *lentilles annulaires*, qui, tout en présentant une ouverture très-grande, réfractent dans des directions sensiblement parallèles tous les rayons émis par une source.

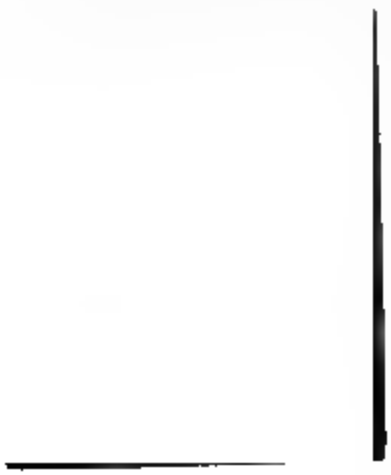


Fig. 609.

La figure 609 représente la section d'une lentille annulaire : L est une lentille plan-convexe, dont le foyer est en *f*, et dont l'ouverture *ifi'* est de 15 degrés environ : elle est environnée d'une série d'anneaux *aa*, *bb*, *cc*, *dd*, dont les surfaces convexes sont calculées de façon que le foyer principal de chaque anneau soit au point *f*. L'ouverture *hfh'* du système tout entier peut être porté jusqu'à 40 degrés environ, sans que les effets de l'aberration de sphéricité deviennent sensibles.

Une lumière intense étant placée au point *f*, toute la lumière émise par elle dans le cône *hfh'* donne naissance, après avoir traversé la lentille, à un faisceau émergent parallèle à *fL*, dont l'intensité reste sensiblement constante jusqu'à des distances considérables : c'est cette disposition qui permet de projeter la lumière des phares jusqu'à 15 ou 20 lieues en mer.

— Afin que les navigateurs puissent distinguer les feux voisins les uns des autres, sur une même côte, on détermine des *éclipses* de lumière, dont la durée et l'ordre de succession sont fixés pour chaque phare. Pour cela, on dispose, autour de la flamme et à la même hauteur, plusieurs lentilles annulaires identiques : le système qui les porte tourne tout entier, d'un mouvement uniforme, autour de son axe vertical. Chaque lentille ne projette alors la lumière dans une direction déterminée que pendant un instant très-court : le navigateur, placé dans cette direction, cesse donc d'apercevoir le feu jusqu'au moment où l'axe de la lentille suivante vient prendre la position qu'avait celui de la première. — Parfois aussi on place, devant une ou plusieurs de ces lentilles, des verres colorés, qui produisent des feux dont les colorations et les intervalles d'alternance sont réglementés pour chaque phare, et connus des navigateurs.

CHAPITRE IV

DISPERSION

I. — DÉCOMPOSITION ET RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE

753. **Spectre solaire. — La lumière blanche du soleil est composée de sept couleurs principales.** — Lorsqu'on fait tomber un faisceau de rayons solaires sur un prisme, il éprouve, ainsi que nous l'avons déjà indiqué (740), une déviation et une dilatation dans le sens perpendiculaire à l'arête réfringente; si en effet on reçoit le faisceau émergent sur un écran perpendiculaire à la direction moyenne des rayons, on obtient, non plus une image blanche et circulaire du soleil, mais une image oblongue et colorée. Dans cette image, les couleurs se succèdent dans l'ordre suivant, en commençant par la partie la moins déviée,

Rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet.

La dilatation qu'éprouve le faisceau en se colorant a reçu le nom de *dispersion :* l'image colorée dont nous venons d'indiquer le mode général de production est ce qu'on nomme le *spectre.* — La figure 610 représente la marche des rayons qui concourent à former le spectre. BAC est la section principale du prisme; RI, le faisceau incident, que nous supposons compris dans le plan de la section principale; MN, la trace de l'écran, qui est placé parallèlement à l'arête réfringente; enfin S et *rv* représentent l'image solaire directe et l'image déviée, sur l'écran supposé rabattu autour de

Fig. 610

par deux courbes qui sont des demi-ellipses.

760. **Chaque couleur du spectre est une couleur simple.** — Une couleur est dite *simple*, lorsqu'il est impossible de la décomposer en d'autres couleurs différentes. — Or, si l'on reçoit le spectre solaire sur un écran percé d'une ouverture assez étroite pour ne laisser passer que des rayons d'une même couleur, par exemple les rayons rouges d'une nuance déterminée, et si l'on fait traverser ensuite au faisceau rouge ainsi isolé un second prisme, on ne découvre, dans les rayons réfractés, aucune autre couleur que la couleur rouge primitive. Cette couleur est donc *simple*.

761. **Les diverses couleurs du spectre sont inégalement réfrangibles.** — Les rayons de différentes couleurs rencontrant l'écran MN (*fig.* 610) à des distances inégales de l'image directe S, on en peut conclure qu'ils ont été inégalement déviés ou réfractés par le prisme. Pour établir d'une manière incontestable cette importante proposition, Newton a eu recours à un grand nombre d'autres expériences. Parmi les plus remarquables, nous citerons les deux suivantes :

1° On reçoit le spectre *ru* formé par le prisme BAC (*fig.* 611) sur un écran MN percé en *m* d'une très-petite ouverture : on isole ainsi un faisceau de rayons, appartenant à une certaine nuance de rouge par

Fig. 611.

exemple. Ce faisceau est reçu sur un deuxième prisme B′A′C′, qui le dévie et le renvoie sur un deuxième écran M′N′, où l'on obtient en *r′* une image rouge. — Si le prisme BAC est monté comme celui de la figure 586, on pourra, en tournant le bouton *b*, déplacer le spectre de manière que l'ouverture *m* reçoive des rayons d'une autre couleur, des rayons violets par exemple : le prisme fixe A′B′C′ recevra alors, dans la même direction, un faisceau de rayons violets. Or l'expérience prouve que ce faisceau subit une plus grande déviation que le faisceau rouge, et que l'image violette vient se peindre en *u′*. Les rayons violets sont donc plus réfrangibles que les rayons rouges.

2° *Expérience des prismes croisés.* — Soit deux prismes placés près l'un de l'autre, l'un P (*fig.* 612) ayant ses arêtes verticales, l'autre P′ ayant

ceau horizontal de lumière blanche qui donne, sans interposition d'aucun prisme, une image blanche S (*fig.* 613) sur un écran. — Si l'on place sur le trajet du faisceau le prisme vertical P, cette image se trans-

Fig. 612. Fig 613.

forme en un spectre horizontal *ru*; si maintenant, derrière le prisme P, on dispose le prisme horizontal P', on voit apparaître en *r'u'* un spectre incliné à 45 degrés par rapport à *ru*. — Ce résultat s'explique aisément, si l'on admet que les couleurs différentes soient inégalement réfrangibles, le faisceau violet tombant sur P' doit alors éprouver une déviation verticale plus grande que celle du faisceau rouge, en sorte que le spectre doit être incliné; de plus, si les angles réfringents des deux prismes sont égaux, les déviations S*r* et *rr'* doivent être égales entre elles, de même que S*u* et *uu'* : donc l'inclinaison du spectre doit être de 45 degrés.

On peut disposer cette expérience de manière à obtenir à la fois quatre images sur l'écran : il suffit de placer les deux prismes, comme les représente la figure 612, de telle sorte que leurs arêtes réfringentes soient tangentes au faisceau incident; ce faisceau est alors partagé en quatre parties 1, 2, 3, 4, dont la première produit l'image directe *S* (*fig.* 613); la seconde donne le spectre horizontal *ru*; la troisième, le spectre incliné *r'u'*; la quatrième, un spectre vertical *r''u''*, dû au seul prisme P'.

762. **Génération du spectre solaire.** — Il est maintenant facile de concevoir la formation du spectre solaire. — Si le soleil n'envoyait que des rayons rouges d'une même nuance, ces rayons donneraient, sur un écran MN

Fig. 614.

(*fig.* 614) placé au delà de l'ouverture d'une chambre obscure, une

image rouge S du soleil. Si l'on recevait ce faisceau sur un prisme, la trace du faisceau réfracté sur le plan de l'écran, qui est oblique à sa direction, serait une petite ellipse rouge : soit *r* cette ellipse, l'écran étant supposé rabattu à droite de MN. — Si maintenant on supposait que le soleil envoyât exclusivement de la lumière violette, on aurait sur l'écran une ellipse violette *u*, plus déviée que l'ellipse rouge. De même, des rayons jaunes, verts, bleus, etc., donneraient des ellipses intermédiaires entre *r* et *u*, mais comprises toutes entre les mêmes droites perpendiculaires à l'arête réfringente du prisme. — Enfin, si l'on considère maintenant le faisceau de lumière blanche que le soleil émet réellement, on voit qu'il se forme sur l'écran une infinité d'images elliptiques, entre celles qui correspondent aux rayons rouges extrêmes et celles qui correspondent aux rayons violets extrêmes : ces ellipses empiètent les unes sur les autres, et il en résulte une image oblongue, où les couleurs se fondent graduellement les unes dans les autres.

763. **Méthode de Newton pour obtenir un spectre pur.** — Il résulte des explications précédentes que, dans le spectre solaire obtenu comme il a été dit jusqu'ici, il y a, en chaque point, superposition de rayons de réfrangibilité voisines. — Pour obtenir un spectre *pur*, c'est-à-dire dans lequel la séparation des rayons de nuances différentes se fasse aussi complétement que possible, Newton a employé la méthode suivante :

On introduit la lumière dans la chambre obscure, par une fente très-étroite. Le faisceau est reçu sur une lentille convergente, placée à une distance de l'ouverture égale au double de sa distance focale principale. Cette lentille donne, sur un écran placé à la même distance, de l'autre côté, une image brillante de la fente lumineuse, et les dimensions de cette image sont égales à celles de la fente (755,2°). Enfin, on fixe le prisme tout près de la lentille, de manière que son arête réfringente soit parallèle à la longueur de la fente, dans une position correspondant à peu près au minimum de déviation (742), et l'on dirige l'écran de façon qu'il soit perpendiculaire à la direction moyenne des rayons réfractés. — Le spectre résulte alors de la juxtaposition d'une infinité de rectangles très-déliés, empiétant très-peu les uns sur les autres. Le mélange des couleurs estd'autant moindre que la largeur de la fente est plus petite.

764. **Recomposition de la lumière blanche.** — Nous avons vu que la formation du spectre solaire s'explique en admettant que la lumière blanche du soleil est formée de rayons différemment colorés, et que le prisme ne fait que séparer ces rayons. Pour justifier complétement cette explication, et montrer que la coloration du spectre n'est pas due à une altérattion que le prisme aurait fait subir à la lumière, Newton a vérifié, par diverses expériences, qu'en superposant de nouveau les rayons séparés par le prisme, on reconstitue de la lumière blanche.

1° *Recomposition par un second prisme.* — Soit RI (*fig.* 615) un faisceau de lumière blanche traversant un premier prisme P : au lieu de re-

que, si l'on place l'écran
avoir une image blanche
au contraire, au delà de *ab*
blanche bordée de violet e
l'expérience vérifie.

En employant un miroi
on opérerait la recomposi

3° *Recomposition par*
Supposons que, sur un di-
secteur *acb* de papier rou

axe perpendiculaire à son
ment est assez rapide po

à celle de l'impression lum

Pour constater la propriété que possè
de développer la phosphorescence ou
cours, l'expérience suivante. Avec un p
sulfate de quinine dans l'acide tartriqu
un carton blanc, et l'on fait tomber le
manière qu'il couvre une partie de s
aperçoit alors, non-seulement la portic
lumineux, c'est-à-dire celle qui était v
quinine, mais encore une certaine long
Le sulfate de quinine n'étant que fluor
qu'on intercepte la lumière incidente.

II. — ÉTUDE DES SPECTRES DE DI
SPECTR

769. Raies du spectre solaire. spectre solaire sur un écran, en employ
pour séparer aussi complétement qu
lités différentes (763), on remarque d
bandes obscures transversales, c'est-à

Fig.

du prisme (*fig.* 620). L'apparition de
émergent montre que, dans la lum
soleil, il n'y a pas continuité parfaite
tions qui la constituent. En d'autres
caractère remarquable, qu'il y manq
ples, dont on peut indiquer le degr
chacun d'eux occuperait dans le spec

Fraunhofer a distingué, parmi les
spectre solaire, sept raies, ou plutôt
par les lettres B, C, D, E, F, G, H. La

son axe aille rencontrer l'une des faces du prisme ; la lunette OL est mobile dans le plan du cercle, de manière que son axe aille toujours rencontrer la face d'émergence des rayons. — Enfin, pour permettre de com-

Fig. 621.

parer exactement entre elles les positions des raies, lorsqu'on examine dans l'appareil des spectres de diverses origines, on fixe encore sur limbe un tube DG, ou tube micrométrique ; à l'extrémité D de ce tube une plaque de verre bien éclairée, et portant une petite échelle form traits gravés sur l'une de ses faces, parallèlement à la fente et à du prisme ; à l'extrémité F est une lentille qui renvoie les ray par ce micromètre sur la face du prisme que regarde la lunette : sont réfléchis par cette face et viennent former dans la lunett du micromètre, qui se superpose au spectre et qui est vue en que lui. Chacune des raies du spectre solaire, ou de tout au alors caractérisée par la division du micromètre à laquelle

* 771. **Spectre des astres.** — La *lune* et les *planè* de lumière propre, mais renvoyant la lumière du solei

La lumière des *étoiles fixes* donne des spectres dont les raies obscures sont distribuées tout différemment ; Fraunhofer avait déjà constaté que le nombre et la disposition de ces raies paraît affecter, dans les étoiles facilement observables, plusieurs types tout à fait distincts. — Ces particularités furent d'abord simplement signalées, sans tentative de théorie pour les relier entre elles.

772. **Spectres des lumières artificielles.** — L'étude des spectres fournis par les lumières artificielles, entreprise par divers observateurs et fécondée d'abord par les recherches théoriques de M. Kirchhoff, puis par les expériences de MM. Kirchhoff et Bunsen, est venue donner à l'ensemble de ces phénomènes une importance inattendue.

Les corps *solides* ou *liquides*, amenés à l'incandescence, donnent toujours un *spectre continu*, sans intervalles obscurs. — Quand on échauffe progressivement un de ces corps, en observant toujours le spectre produit, on constate que les phénomènes se succèdent dans l'ordre suivant. A des températures assez basses, la radiation du corps ne contient que des rayons calorifiques obscurs, c'est-à-dire les rayons les moins réfrangibles (767). Puis, la température s'élevant davantage, aux rayons obscurs s'ajoutent des rayons lumineux : ce sont d'abord les rayons rouges, puis les rayons orangés et jaunes, et ainsi de suite, par ordre de réfrangibilité croissante ; les rayons violets apparaissent seulement à la *température blanche*. En même temps, apparaissent aussi les rayons chimiques, dans une étendue d'autant plus grande que la température est plus élevée : les rayons ultra-violets ne se manifestent qu'à une température supérieure à celle qui donne un spectre visible complet.

Les corps *gazeux* incandescents émettent une lumière qui est caractérisée par un *spectre discontinu* : pour ces corps, comme pour les corps solides et liquides, on constate bien encore que des rayons de réfrangibilités croissantes apparaissent à mesure que la température s'élève, mais chaque corps ne peut émettre que certaines espèces de rayons, de réfrangibilités déterminées ; en sorte que le spectre des gaz est formé de lignes brillantes, séparées par de larges intervalles obscurs. Ces lignes brillantes ont une couleur et une position caractéristiques pour chaque gaz en particulier. — Pour constater ces propriétés, il est indispensable d'opérer avec des corps absolument gazeux ; les flammes de gaz tenant en suspension des particules solides fournissent des spectres continus, parce que l'éclat des particules solides incandescentes l'emporte toujours sur celui du gaz lui-même. Ainsi, les flammes de nos bougies, de nos lampes, qui doivent leur propriété éclairante aux parcelles de charbon mises en liberté pendant la combustion, donnent toujours des spectres continus, dans lesquels certaines parties ont seulement une intensité prédominante.

L'arc voltaïque, dont nous
(552), fournit une lumière d
extrêmement brillantes, varia
deux électrodes, et caractéris
firme l'idée que nous avion
est formé par des particules
et formant une sorte de cond

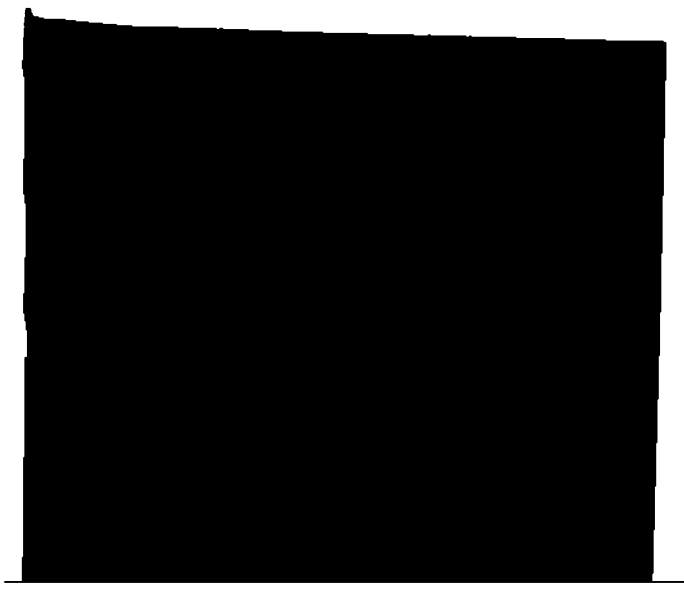
773. **Analyse spectrale.** tent entre les spectres prod l'état de gaz ou de vapeurs d'analyse d'une extrême sen ont donné un développemen du gaz d'éclairage par un co ler complétement le charbon introduisant dans cette flam quantités, ils l'ont vue pren spectroscope des spectres d du sodium dans la flamme e d'une raie jaune très-brill par une raie jaune différen par des raies rouges et oran d'investigation est d'ailleurs de déceler dans la flamme gramme de sodium, de neuf

Enfin, l'apparition de ra métaux déjà connus, a cond Bunsen à la découverte de dium, qui ont ensuite été i ques. — Bientôt après, un t terre par M. Crookes, sur la a été isolé en France par M.

774. **Expérience du r** riences suivantes sont deve de toute une théorie qui l

1° La flamme de l'acool s tiennent un sel de sodium, une lumière dont le spectr occupant dans le spectrosc obscure du spectre solaire

2° Si l'on fait tomber da par un corps solide porté chaux de la lumière de Dr mettre le courant de l'arc et absolument continu : si



De la comparaison de ces deux expériences, il résulte que la flamme contenant du chlorure de sodium, en même temps qu'elle a la propriété d'*émettre* exclusivement des rayons jaunes, possède aussi la propriété d'*absorber* la lumière jaune émise par une source lumineuse plus intense, sans absorber les autres couleurs que contient cette lumière. — Au reste, ce n'est pas là une propriété spéciale aux sels de sodium. Le chlorure de lithium, placé dans une flamme non éclairante, donne un spectre qui est remarquable par une ligne rouge brillante, correspondante au milieu de l'intervalle entre la raie B et la raie C de Fraunhofer. Cette flamme, placée sur le trajet du faisceau lumineux produit par la lumière de Drummond, fait apparaître dans cette lumière une raie noire correspondante; enfin, il en est de même encore quand on interpose cette même flamme sur le trajet d'un faisceau de lumière solaire : on y voit encore apparaître la même ligne noire, dans la même position, en un point où l'expérience n'accusait pas de lacune dans la lumière solaire.

Ces résultats ont été généralisés par M. Kirchhoff : ils se déduisent immédiatement du principe de la proportionnalité entre le *pouvoir émissif* et le *pouvoir absorbant* d'un même corps, pour des rayons d'une espèce déterminée, principe qui est une extension de celui qui avait déjà été établi pour la chaleur. Puisque la flamme de l'alcool salé donne, à la température de sa combustion, un spectre qui se réduit à une double ligne jaune, cette flamme n'a de pouvoir émissif, à cette température, que pour les radiations jaunes : elle doit donc avoir un pouvoir absorbant considérable pour les radiations jaunes émanées d'une autre source, et un pouvoir absorbant sensiblement nul pour toutes les radiations d'une autre espèce. Dès lors, lorsque le faisceau de la lumière de Drummond traverse cette flamme, les rayons jaunes de ce faisceau perdent une partie considérable de leur intensité; d'autre part, les rayons jaunes émis par la flamme elle-même, qui est à une température plus basse, n'ont pas une intensité qui compense la perte d'éclat du faisceau transmis : *on doit* donc bien obtenir, dans la région du spectre affectée aux rayons de cette couleur, une double bande obscure, tranchant sur les autres couleurs dont l'éclat n'est pas amoindri. — Cette explication s'étend à toutes les expériences semblables, c'est-à-dire à toutes celles dans lesquelles on produit le phénomène qui est aujourd'hui désigné sous le nom de *renversement des raies* (*).

(*) Léon Foucault, en éclairant une fente dans une moitié de sa longueur par la lumière solaire, et dans l'autre moitié par l'arc voltaïque, avait établi la coïncidence entre la bande obscure D de la lumière solaire et la bande jaune brillante signalée par tous les observateurs dans la lumière électrique et dans la plupart des lumières artificielles. De plus, en faisant passer la lumière solaire au travers d'un arc voltaïque dont l'éclat est moindre, il avait observé que la bande obscure D du spectre devenait beaucoup mieux accusée que dans le spectre solaire ordinaire. — M. Swann avait

775. **Explication de la pr**
laire, d'après M. Kirchhoff.
à la théorie qui a été donnée par
obscures dans le spectre de la lu

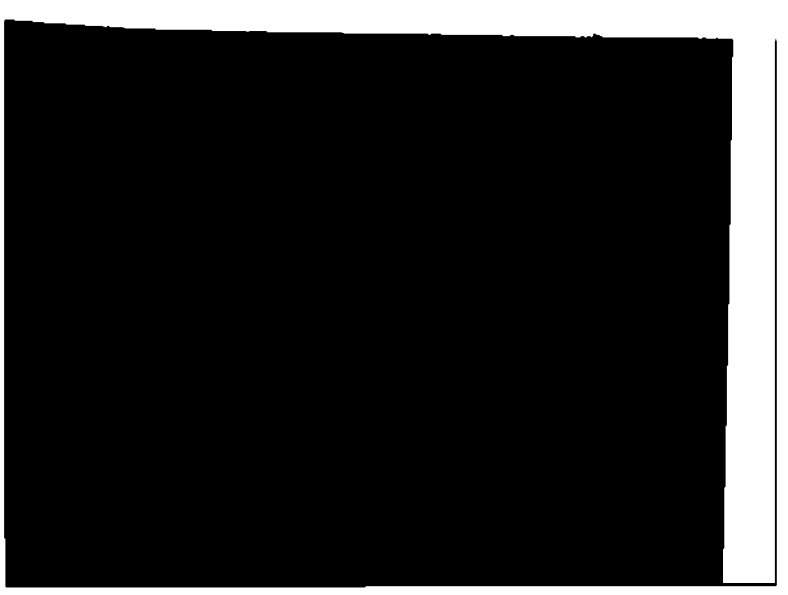
M. Kirchhoff admet que le noy
loppé d'une *photosphère* gazeuse,
férieur au sien. Sans la présence
verrait une lumière qui produi
photosphère se comporte, par ra
comme la flamme d'alcool salé pa
incandescente, c'est-à-dire que l
la photosphère, la plus grande
correspond à ceux que la photos

M. Kirchhoff a déterminé, av
raies obscures du spectre solair
brillantes des corps connus : c
coïncidence exacte, entre certai
les lignes brillantes fournies par
clure la présence de ce corps dar
sibilité d'une véritable analyse
déjà fourni les résultats les pl
dium, le calcium, le magnési
tainement partie de l'atmosphè
cette assertion est fondée sur l
raies brillantes du spectre four
du spectre solaire.

776. **Raies telluriques.** –
tre solaire, ou plutôt certaines
comme ayant pour origine l'al
l'atmosphère même de la ter
soleil se rapproche de l'horizo
les rayons solaires est alors pl
raies telluriques. — M. Jansse
plupart de ces raies dans le sp
traverser à cette lumière un
d'eau : c'est donc à la présen
terrestre qu'il faudrait attribu
tion de ces raies particulières.

777. — **Résultats relati**
lestes. — L'analyse spectrale

montré également que la présence
la plupart des lumières artificielles
ceptibles de chlorures de sodium d
brillante. — Jusqu'à M. Kirchhoff, c
isolées.



par les planètes, a montré que les spectres fournis par Jupiter et par Saturne, quand ces astres sont bien au-dessus de l'horizon, contiennent des raies obscures, analogues aux bandes que produit l'absorption due à l'atmosphère terrestre. Ces raies portent donc à admettre, comme d'autres observations l'avaient déjà fait penser, que ces planètes sont entourées d'une atmosphère gazeuse : leur position, concordante avec celle des raies dues à la vapeur d'eau, conduit à penser qu'il existe, à la surface de ces planètes, de grandes nappes d'eau, entretenant leur atmosphère dans un état d'humidité continue. — Quant à la lune, l'analyse spectrale aussi bien que les autres modes d'observation indique que c'est une planète n'ayant pas d'atmosphère gazeuse.

Enfin, un grand nombre d'observateurs ont étudié, depuis quelques années, les spectres des astres qui ont un éclat propre. — Toutes les *étoiles* dont l'éclat est suffisant pour qu'elles produisent un spectre facilement observable donnent des spectres continus, sillonnés seulement de raies obscures (*).

L'analyse spectrale a constaté également, dans les étoiles, un certain nombre des éléments chimiques qui constituent la terre et le système solaire : rien n'empêche d'admettre, au moins jusqu'ici, que les éléments dont la présence n'a pas été encore manifestée y existent cependant, et que l'imperfection de nos moyens d'observation, ou des circonstances physiques particulières, nous ont empêché jusqu'ici de les découvrir.

Quant aux *nébuleuses*, toutes celles que les instruments puissants ont pu *résoudre* et qu'on sait être formées par un amas d'étoiles bien déterminées ont donné, à l'analyse spectrale, des spectres continus, sillonnés seulement de raies obscures : leur constitution physique paraît donc semblable à celle du soleil et des étoiles. Au contraire, celles dans lesquelles les instruments les plus puissants n'ont pu voir jusqu'ici qu'une sorte de nuage lumineux fournissent, pour la plupart, un spectre formé de quelques raies brillantes, quatre au plus, se détachant sur un fond obscur : cette apparence est celle qui caractérise un gaz lumineux ; ces raies semblent, par leur position, appartenir à l'hydrogène et à l'azote. — Enfin, il est des nébuleuses qui fournissent à la fois un spectre lumineux continu et très-faible, et quelques bandes plus brillantes. Ce résultat semble indiquer, conformément aux idées d'Herschel, un état intermédiaire entre l'état gazeux des nébuleuses proprement dites, et l'état de condensation de la matière cosmique qui a produit les astres eux-mêmes.

(*) Ces raies sont peu nombreuses et peu intenses dans les spectres des étoiles blanches : elles sont plus larges dans celles des étoiles colorées, et elles sont alors surtout nombreuses dans les régions du spectre qui sont le plus éloignées de la couleur propre à l'étoile.

STRUCTURE F

778. **Structure de l'œil.** nous indiquerons spécialemer rôle dans le phénomène de l

Le *globe de l'œil* présente sphère : la figure 622 en pré d'avant en arrière. SS est un brane blanche, opaque et rés à laquelle sa consistance a fa ner le nom de *sclérotique* dur). — C est une autre mer enchâssée en avant dans une ture circulaire de la prem complétant avec elle l'envel globe de l'œil : sa courbure prononcée que celle de la s que, c'est-à-dire que sa surf sente la forme d'une por sphère d'un rayon plus petit de la sclérotique ; elle est rente et incolore : on lui d distinguer de la sclérotique

A l'intérieur du globe, d trouve une cloison membr l'œil : c'est l'*iris* I, I, percé *pupille* P. La membrane de lorations différentes, varia l'iris, et à une très-petite d *cristallin* L, dont la face rieure. Cette lentille est fo

brane nerveuse qui est trai
sance à la sensation lumine

780. **Formation des i** un œil de bœuf et que, aprè transparente à sa partie po timètres en avant de la c peindre sur le fond de l'œil semble des milieux de l'œ vergent qui concentre, sur l les rayons lumineux émané les rayons émis par un poi viennent faire leur foyer en émanés d'un point A, plac

nent converger en un poin point A ; il en est de mêm autres points d'un objet A sent tous ces axes seconda à une petite distance de la

La construction géomét que l'image est renversée versement de l'image, nou C'est ce dont on peut se r point A′ de la rétine étant nous rapportons la positi points de l'axe secondair autres points de la rétine parties de la membrane r disposition relative vérital

781. **Vision à différ aux distances.** — L'e vues ordinaires, la vision distances très-diverses. — distance qu'on peut consi

sphère est bien transparente, la lune nous apparait avec des contours très-arrêtés. Pour les objets placés à quelques mètres, la vision est encore parfaitement nette, et à mesure que les objets se rapprochent, nous commençons à en percevoir de mieux en mieux les détails. — Enfin, lorsqu'on veut discerner dans un objet des détails aussi petits que possible, on diminue de plus en plus sa distance de l'œil : cependant la vue ne conserve sa netteté que si cette distance ne devient pas inférieure à une limite déterminée, qui est de 15 centimètres environ pour les vues ordinaires et qui varie d'ailleurs, comme nous l'indiquerons plus loin, avec les individus : c'est ce qu'on peut appeler *distance minimum de la vision distincte*. — Quand la distance descend notablement au-dessous de cette limite, la perception perd sa netteté : les contours des objets paraissent troubles et estompés, et tous les détails se confondent.

Or les physiciens et les physiologistes s'accordent à admettre que la vision ne peut avoir de netteté qu'autant que les rayons lumineux forment sur la rétine une image ayant elle-même une netteté parfaite. Il reste donc à expliquer comment ces images peuvent continuer d'être nettes, pour des distances très-différentes des objets. — Il est aujourd'hui démontré que l'œil est construit de façon à concentrer sur la rétine, naturellement et sans effort, les rayons émanés des *objets éloignés* ; que le même résultat est obtenu, pour les objets *très-rapprochés*, par une *adaptation* particulière, dont le mécanisme réside principalement dans un changement de courbure des faces du cristallin. — Ces changements de courbure peuvent être manifestés de la manière suivante :

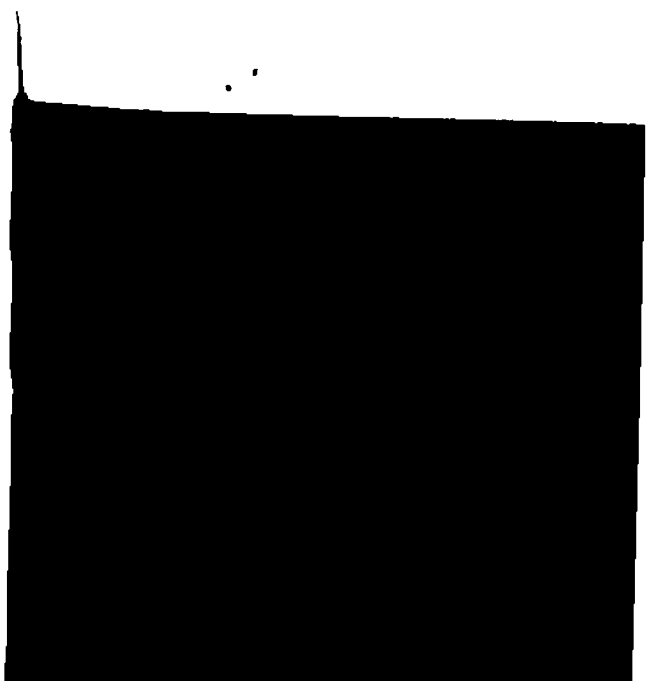
Lorsqu'on présente une bougie à l'œil d'une personne placée dans une chambre obscure, on distingue facilement, en regardant l'œil au moyen d'une loupe fixée au fond d'un tube, trois images de la bougie. Celle de ces trois images qui est la plus rapprochée du spectateur est droite et virtuelle : c'est celle qui a été observée par tout le monde, et qui est formée par la réflexion des rayons sur la convexité de la cornée (729). Celle qui est la plus éloignée est également droite et virtuelle ; elle est due à la réflexion sur la face antérieure du cristallin. Enfin on aperçoit, entre les deux précédentes, une image renversée et réelle qui est produite par la réflexion sur la concavité de la face postérieure du cristallin (724, 1°). Or si, laissant toujours la bougie en présence de l'œil, on fait regarder successivement à la personne en expérience, d'abord un objet très-éloigné, puis un objet situé à 15 ou 18 centimètres, on voit la première image de la bougie rester fixe, ce qui indique que la cornée ne change pas de forme ; mais, au moment où l'œil se fixe sur l'objet rapproché, on voit la seconde image droite s'avancer vers le spectateur, ce qui prouve que la face antérieure du cristallin devient plus convexe ; l'image renversée éprouve aussi un petit déplacement, accusant une faible variation de courbure de la face postérieure. — Nous ajouterons que l'anatomie a démontré, dans les membranes qui assujettissent le cristallin.

la présence de fibres muscu
attribués ces changements

D'après cela, les diverse
tances sont faciles à concev
est nette, parce que l'imag
sans qu'il soit besoin d'au
sont pas perceptibles, parce
ment petite par rapport à l'
prochés les uns des autres
ment voisins; or la rétine e
des diamètres appréciabl
même élément correspond
peut transmettre qu'une i
prochant jusqu'à une dista
distance à laquelle on pla
ordinaire pour lire sans fat
avec des modifications à
calcul montre que la posit
de millimètre (à peu près
rapproche ainsi, les détail
guer, parce que l'image
des points voisins se sépar
rive jusqu'à 15 centimètre
les vues ordinaires, les co
donc encore se former n
de sorte que la vision dar
compagnée de fatigue. —
placé près de l'œil, celui-
mineux correspondent à
des faisceaux lumineux
sur la rétine un cercle,

(*) On a d'abord cherché dar
de l'adaptation de l'œil pour
sidéré est très-éloigné, l'œil
rait pour admettre les rayo
alors converger plus près du
ce serait l'inverse pour la vis
ration sensible de sphéricité
peut remarquer enfin que, c
l'opération de la cataracte,
lentille convergente qu'on p
vergence de cet organe, ne
minée, laquelle dépend de l

Nous admettrons, avec la
observée dans la vision des
dans la quantité de lumière
pas quand le point éloigné



quelle cet œil puisse voir distinct
exactement sur la rétine.

783. **Diamètre apparent. -**
tives des objets placés à u
le nom de *diamètre apparent* d'

position déterminée, *l'angle* AC
optique de l'œil aux extrémités o

Pour rendre compte de ce
objets tels que AB, placés à la
port à CP pour que l'angle ACB
mension de l'image A'B' sur la

de donner le nom de diamètre

or $\frac{AB}{CP}$ n'est autre chose que le
sensiblement, eu égard à la pet
lui-même. On peut donc écrire

$$A'B' =$$

on voit donc que, si la distance
proportionnelle à l'angle ACB (

Quand l'œil compare des ob
ger, par les rapports de leur

(*) Cet angle reçoit encore quelq

Cependant, quand les données fo
tance des objets présentent à l'œil
quefois de leur grandeur absolue,
en reçoit et qui est d'autant moindre
soit en comparant leur diamètre a
connaît les dimensions. C'est ainsi
arbre situé très-loin, au milieu d'u
mativement par son éclairement a
une certaine habitude de ce genre
beaucoup plus précise lorsqu'on p
homme, un cheval, ou un corps q
mativement les dimensions absolues

786. **Unité de l'impression**
Lorsque les deux yeux sont fixés s
mineux, nous ne voyons en général,
qu'un seul point.

L'observation a montré que cett
de deux conditions physiques : 1° q
vers le point lumineux ; 2° que les
occupent des positions rigoureuse
ditions ne sont pas simultanément
ainsi, par exemple, que si l'on vie
en exerçant sur lui une légère pres
C'est ainsi encore que, si les yeux s
tance déterminée, dans le plan de s
ce même plan, à une distance pl

787. **Appréciation du relie**
présentent des reliefs, lorsqu'ils s
duisent pas dans les deux yeux
n'ayant pas la même position par
certains points qui sont masqués
sont ces deux sensations, produit
un peu différentes, qui donnent li

La meilleure preuve qu'on en pu
quand on a laissé quelques instan
réoscope. Les deux images placées
quels on applique les deux yeux,
sent les deux aspects sous lesque
distance convenable, en les fixan
yeux ; l'effet de l'instrument est
deux images comme s'ils partaien
à une distance où la vision soit l
complète, quand les images sont
est bien adapté à la vue de l'obse

d'un centième de millimètre. On mesure la distance qui existe entre les

Fig. 627.

images de deux de ces traits, et on la divise par leur distance réelle : le quotient est le grossissement linéaire. — Pour en déduire le *grossissement superficiel*, c'est-à-dire le rapport entre la surface de l'image et celle de l'objet, on remarque que, l'image et l'objet étant des figures semblables, le rapport de leurs surfaces est égal au carré du rapport des dimensions homologues : en d'autres termes, le grossissement superficiel est exprimé par le carré du grossissement linéaire. Si, par exemple, le grossissement linéaire est représenté par 100, le grossissement superficiel est représenté par 10 000.

790. *Éclairement de l'objet au moyen de la lumière solaire, ou des lumières artificielles.*—L'image A'B' étant toujours très-amplifiée, et n'étant formée que par le concours des rayons émis par l'objet sur la lentille il est indispensable d'éclairer fortement l'objet, si l'on veut que l'im elle-même ait un éclat suffisant. Pour cela, on reçoit les rayons du sur un miroir MM' (*fig.* 627) : ce miroir les réfléchit dans une di horizontale où ils rencontrent successivement deux lentilles L les concentrent dans une très-petite région I : on place l'objet au delà, dans le cône des rayons divergents. — L'objet est deux lames de verre, lesquelles sont maintenues par un *port* on peut faire varier la distance à l'*objectif l* de manière l'écran une image nette.

La lumière solaire faisant souvent défaut, on la remp mières artificielles. — On emploie, par exemple, celle dirigeant, sur un petit cylindre de chaux, un jet enfla gène et oxygène (*lumière de Drummond*). La *lumière*

la lentille, on pourra prendr
ment linéaire :

Cette expression montre qu
de la distance minimum de
avec une même loupe, pour
mule montre aussi que le gro
sonne, lorsque la distance foc
des faces de la lentille biconv

796. **Défaut d'achroma**
des rayons lumineux qui tra
mier abord, que l'achromati
jamais les images ne doivent
par les rayons rouges partis
A′ de l'axe secondaire AC, l'i
même point devra se produi
Le centre optique de l'œil é
images du point A seront vu
tront se superposer. — Cepe
des images données par la l
sont d'autant plus marquées
prononcées ; cette dernière c
tisme est dû à l'aberration d
pour les rayons rouges et po

On a reconnu que ces el
beaucoup atténués, lorsqu'o
système de deux lentilles de
dres, et fixées à peu de dist
qui prend le nom de *loup*
grossissement, des images
loupe simple.

797. **Microscope comp**
auquel sont dus les plus imp
relles, remonterait, suivant
et serait due au lunetier Za
tribuent au naturaliste Leuv
dix-septième siècle.

Au point de vue physiqu
ment la réunion d'un micr
effet : 1° un *objectif*, qui d
placé à une distance de ce
focale principale ; 2° un *oc*

La figure 630 indique la marche des rayons dans le microscope composé. AB est l'objet qu'on veut observer; ll' est l'objectif, dont les foyers sont en f et en f'; LL′ est l'oculaire, dont les foyers sont en F et en F′. — L'objet AB, placé à une distance Pc de l'objectif un peu supérieure à la distance focale principale $f'c$, donne une image réelle A_1B_1, renversée et amplifiée. L'oculaire LL′ est placé à une distance P_1C de l'image A_1B_1, inférieure à la distance focale principale F′C; les rayons, qui se sont croisés aux différents points de A_1B_1, continuent leur route au delà de ces points et rencontrent l'oculaire, qui les réfracte à son tour, comme il réfracterait des rayons émanés d'un objet lumineux placé en A_1B_1, et qui donne une image virtuelle A′B′, visible pour l'œil placé au delà (*). En réglant convenablement les diverses distances, on amène l'image virtuelle à se former, pour chaque observateur, à la distance minimum de la vision distincte.

Fig. 630.

798. **Pièces accessoires du microscope.** — La figure 631 représente un microscope composé, construit par M. Nachet de manière à permettre d'effectuer facilement la plupart des études d'histoire naturelle.

L'oculaire et l'objectif sont assujettis dans un tube métallique AB, supporté par un collier C; les objets, placés entre deux lames de verre transparentes, sont déposés sur la plaque P ou *porte-objet*, au-dessus de l'ouverture circulaire pratiquée en son milieu. Lorsque les objets sont transparents, on les éclaire en dessous, au moyen du miroir concave M, sur lequel on reçoit la lumière des nuées ou celle d'une lampe : on règle la position de ce miroir, de façon que l'objet se trouve à peu près à son

(*) Dans la figure 650, on a effectué d'abord, pour déterminer les extrémités de l'image réelle A_1B_1, les constructions qui avaient été indiquées pour le microscope solaire (789); ensuite, pour déterminer les extrémités de l'image virtuelle A′B′, les constructions indiquées à propos de la loupe (794).

lentille convergente. — Le collier C qui soutient le tube du microscope est fixé à la colonne creuse D, et une vis V placée dans l'axe de cette colonne permet de la faire monter ou descendre, de manière à éloigner ou à rapprocher le tube du porte-objet et à rendre la vision nette pour la vue de l'observateur.

L'oculaire est formé, en général, de deux lentilles convergentes, combinées de manière à constituer l'un des systèmes d'*oculaires composés* qui seront indiqués plus loin (802). L'objectif comprend deux ou trois lentilles à très-court foyer. — L'un ou l'autre système peut être remplacé par un certain nombre de systèmes de rechange, pour obtenir des grossissements variables.

Fig. 631. — Microscope composé.

799. **Grossissement du microscope.** — Le *grossissement linéaire* du microscope composé se définit, comme celui de la loupe, par le rapport entre les diamètres apparents de deux dimensions homologues l'image virtuelle et de l'objet, l'image et l'objet étant supposés l'un l'autre à la distance minimum de la vision distincte. On démontre aussi, par un raisonnement semblable à celui que nous avons fait pour la loupe (795), que ce grossissement est égal au rapport entre deux dimensions homologues de l'image et de l'objet. Or, en se reportant à la figure 630, on a :

$$G = \frac{A'B'}{AB}.$$

Cette expression peut s'écrire :

$$G = \frac{A'B'}{A_1B_1} \times \frac{A_1B_1}{AB}.$$

vergent qui a pour somme
faisceau convergent qui a p
point *m* soit compris dans l
fira donc que ce dernier fai
l'oculaire. Or le faisceau *ln*
formé de rayons qui s'écart
son axe *cm'*; on peut do
condition nécessaire et suff
le point *m* soit compris
c'est que la droite *mc*, me
au centre optique de l'obj
contrer l'oculaire. — De l
que, si l'on imagine un
sommet au centre optique
s'appuyant sur les bords d
la nappe lcl' de ce cône s
champ.

Si maintenant on consi
qui forment les axes des
neux correspondants aux
champ, ces rayons passen
optique *c* de l'objectif; si d
pour un instant, qu'ils ém
lui-même, on voit que, ap
fractés par l'oculaire, ils vi
ser au point C', foyer co
rapport à LL'. — De là ré
est placé en ce point C', c
point oculaire, il reçoit de
les points du champ, c'est
le champ tout entier.

802. **Des divers sy**
laires composés, emp
microscopes. — Les o
en une simple lentille con
tème de deux lentilles,
position de ces lentilles p
laire, le système prend
sitif.

1° L'*oculaire négatif* o
comme différant d'un ocu
seconde lentille L_1L_1', plac
former les images réelles
que *m* n'est plus au point

Il est facile de voir que, si les courbures de ces lentilles sont convenablement calculées, l'*achromatisme* de l'image virtuelle peut être obtenu au moyen de cet oculaire composé, lors même que l'objectif ne serait pas achromatique. — En effet, soit $a'b'$ et $a''b''$ (*fig.* 634) l'image rouge et l'image violette que formeraient les rayons de ces deux couleurs, après avoir été réfractés par l'objectif ll' ; l'interposition de la lentille L_1L_1' transportera les points a' et a'' en leurs foyers conjugués a_1 et a_2, situés sur les axes secondaires C_1a' et C_1a'' : on conçoit donc qu'on puisse calculer les distances focales des deux verres de l'oculaire de façon que les points a_1 et a_2 soient en ligne droite avec le centre optique C de LL', en sorte que ces deux points soient vus par l'œil dans la même direction.

2° L'*oculaire positif* ou *oculaire de Ramsden* n'est autre chose qu'une *loupe composée*, formée de deux lentilles convergentes qui sont situées l'une et l'autre au delà de l'image réelle donnée par l'objet. — Cette image réelle peut donc ici se former, et c'est elle qu'on regarde au travers du système des deux verres.

Fig. 634.

On verra facilement, à l'aide d'une construction semblable à celle que nous venons de faire pour l'oculaire négatif, que les deux courbures peuvent être calculées de façon à réaliser l'achromatisme de l'image virtuelle.

803. **Lunette astronomique.** — L'invention de la *lunette astronomique* paraît due à Zacharias Jansen, et remonte aux dernières années du seizième siècle. — Cet instrument reproduit, dans ses parties essentielles, la disposition du microscope composé. Il présente un objectif convergent, qui donne une image réelle de l'objet, et un oculaire convergent, faisant fonction de loupe, et donnant une image virtuelle qui est contemplée par

(*) Cette lentille $L_1L'_1$ est quelquefois désignée sous le nom de *verre de champ* ou de *lentille collective*. On voit, en effet, que l'interposition de cette lentille ramène vers le centre C l'axe du faisceau provenant du point m qui vient rencontrer cette lentille. Il peut donc arriver que ce faisceau rencontre alors la lentille LL', lors même que la droite cm' ne la rencontrerait pas. Donc la présence de la lentille $L_1L'_1$ *augmente le champ* de l'instrument. — En revanche, elle *diminue le grossissement*, puisque chacun des points de l'image réelle est ainsi rapproché de l'axe de l'appareil.

l'objectif doit alors être une très-
quantité suffisante de lumière et
éclairée.

La figure 635 indique la march
jectif et L′ l'oculaire; l'objet lumin
éloigné. Un peu au delà du foyer l
forme une image réelle, renversée
présentée en A_1B_1 et l'on s'est born
daires ACA_1 et BCB_1 de ses extrém
regarde l'image aérienne A_1B_1, a s
cette image, dans le voisinage du
image virtuelle A′B′, droite par ra
port à l'objet. — On voit que les r
l'objet sur l'objectif L forment, au
converge en A_1; au delà de ce poi
rencontrent l'oculaire; celui-ci les

F

semble émaner du point A′. On s
partis des autres points de l'objet.

L'impossibilité où l'on est de cl
ment, comme on le faisait pour le
l'oculaire, pour adapter la lune
formé par un système de lentille
l'extrémité d'un gros tube de mé
B, s'engagent deux *tirages* CD et
tres plus petits, dont le dernier p
distincte, on commence par faire
tube CD, jusqu'à ce que l'image
achève ensuite de *mettre au poi*
déplacements dans un sens ou d
qui correspond à un bouton exté

sement :

$$G = \frac{F}{f}.$$

Cette expression montre que le grossissement est d'autant plus fort que F est lui-même plus grand par rapport à f : c'est là une remarque importante, sur laquelle nous reviendrons plus loin.

805. **Mesure expérimentale du grossissement.** — Pour déterminer par expérience le grossissement d'une lunette, Galilée employait une échelle divisée, placée à une grande distance ; il regardait cette échelle à travers la lunette, avec un œil, tandis qu'avec l'autre œil il la regardait directement ; le grossissement était donné par le nombre n de divisions vues à l'œil nu qui correspondaient à une seule division vue à travers la lunette.

Pouillet a perfectionné ce procédé, en employant une espèce de chambre claire (*fig.* 637), qui se fixe à l'oculaire au moyen des vis v, v, et qui se compose de deux miroirs métalliques m, m', ayant leurs faces réfléchissantes en regard l'une de l'autre et inclinés à 45 degrés sur l'axe de la lunette. Le miroir m est percé d'un petit trou, par lequel on voit l'échelle à travers la lunette, tandis que les rayons réfléchis par les deux miroirs, comme l'indique la figure, la font voir telle qu'elle apparaîtrait à l'œil nu.

Fig. 637.

806. **Champ de la lunette. — Point oculaire.** — Le *champ* d'une lunette est, comme celui du microscope, l'espace dans lequel un point placé devant l'objectif doit être compris, pour que l'image de ce point puisse être vue par l'œil placé à l'oculaire. — On voit sans peine, comme nous l'avons montré pour le microscope, que cet espace est limité par la nappe antérieure d'un cône ayant son sommet au centre optique de l'objectif, et s'appuyant sur les bords de l'oculaire.

Il en résulte que, pour un même oculaire, le champ est d'autant plus petit que la distance focale principale de l'objectif est plus grande, c'est-à-dire que le grossissement de la lunette est plus considérable. La petitesse du champ de certaines lunettes rend très-difficile

(*) Cette approximation n'est complétement légitime que si l'œil est adapté pour la vision à une très-grande distance, puisque c'est alors l'image A_1B_1 doit, pour être vue distinctement dans l'oculaire, être à peu de son foyer. — C'est ce qu'on exprime quelquefois en disant que la formule précédente indique la valeur du grossissement *pour un œil infini*.

manière incomplète.

Il faut remarquer seulement q
dans le plan où se forme l'ima
position fixe quand on emploie
le placer entre les deux lentill
les porte. Avec l'oculaire positif,
dans une position fixe, dans le
possible alors d'employer des ré
par rapport aux autres, à l'aid
évaluer, au moyen des déplace
apparents des objets.

809. **Lunette terrestre.** — septième siècle par le P. Reitha
gents de la lunette astronomic
destinées à redresser l'image
ainsi redressée qu'on regarde à

La figure 638 indique la marc
lunette. — Soit A_1B_1 l'image ré
tille convergente ayant l'un de s
réelle A_2B_2, et son autre foyer e
et dont les foyers soient f' et f
mineux qui se sont croisés au
avoir traversé les deux lentill
réelle, mais redressée. — En
point A_1, l'un dirigé suivant le

lèlement à l'axe commun des
une distance de l égale à la
considérés seront réfractés p
daire A_1m; le rayon A_1i ira
rayons rencontreront ensuite
optique c' de cette lentille, l'a
direction, on peut supposer
axe secondaire, à gauche de l

une vingtaine d'années avant le
tage sur le télescope de Newton,
tion où ils sont réelle-
ment par rapport à l'ob-
servateur, et qu'il donne
des images droites. —
MN (*fig.* 643) est un mi-
roir concave qui donne en
A_1B_1, un peu au delà de
son foyer F, une image
réelle et renversée de
l'objet AB : cette image
est redressée et amplifiée
en A_2B_2 par un second
miroir concave *mn*, beau-
coup plus petit que MN,
et tourné en sens con-
traire; enfin, on observe
l'image A_2B_2 au moyen
de l'oculaire *l'*, qui est
adapté à une ouverture
centrale du miroir MN, et qui d
de la vision distincte.

voir EE]que d'une petite quantité, o
sans fin V qui est fixée à la plate-f
l'on veut imprimer au plateau EE
éloigne la vis sans fin V, de façon q
tourne alors librement, et quand il
avoir, on achève de l'y amener en r
sens ou dans l'autre.

CHA

NOTIONS SOMMAIRE

819. La *photographie* est l'a
lumière. — Nicéphore Niepce e
vir la lumière pour peindre des
de Judée, soit sur l'iodure d'arge
vaux, découvrit l'influence des
l'image encore latente, et trouv
ques années après, Fox Talbo
qui remplace à peu près exclu
plaque.

820. **Chambre noire pou**
présente une chambre noire de
laire formée de deux parties B
à la face antérieure est fixé l
postérieure EE′ est enchâssée
peindre les images renversée
(753.1°). Pour amener la glace
à la lentille, le photographe se
cer ou reculer jusqu'à ce qu
opération en imprimant, au t
cements dans un sens ou dan

La marche des rayons lum
montre la coupe d'une chamb
placé à une distance supérieu
pale CH de la lentille LL′ : l'i
point dont la distance à l'obje

(°) Pour déterminer le foyer cor
passe au foyer principal de gauche
pal : ce rayon rencontre l'axe seco
On déterminerait de la même ma

— Il faut ènsuite *sensibiliser* l
sionnable à la lumière ; pour c
à la vapeur d'iode, jusqu'à ce
la lueur d'une bougie ; on la
environ, à la vapeur du brom
plaque se couvre d'une pellicul
stances qui sont décomposable

La glace dépolie EE′ de la cl
au foyer conjugué de l'objet, o
la plaque préparée, que l'on a
port. L'image vient alors se pe
mure d'argent sont décompos
d'autant plus complète que la
liberté. — Au bout d'un certai
plaque et avec l'éclairement d
la plaque et on la rapporte da
les opérations.

Pour cela, on expose la pla
se fixe dans tous les points où i
imperceptibles qui produisent
apparaît donc, et les clairs s'y
qui conservent l'aspect miroita
facerait bientôt si on la transp
décomposerait à son tour : il
lumière. On y parvient en lav
fite de soude, qui dissout le b
donner à l'image plus de fixi
que : pour cela, on répand u
fite de soude sur l'épreuve p
dessous avec une lampe à al
l'épreuve.

822. **Photographie sur** p
sur papier ou sur verre prése
elle exclut le miroitement des
autant d'épreuves que l'on ve
ration comprend deux parti
négative ; 2° le tirage des *épr*

823. **Production de l'ép**
cliché ou *épreuve négative* u
qui étaient éclairées sont rep
par des teintes blanches. —
sur papier, mais plus géné
d'une couche de collodion o

Pour les portraits, on emp

cela, on étend la feuille sur u
après l'avoir fait sécher, on l'é
d'azotate d'argent, qui transf
d'argent, et l'on fait sécher de
l'exposition à la lumière au-de
solution de chlorure d'or, et
lave, pendant cinq heures au n
nouvelée, et il ne reste plus
d'autant plus inaltérable que l

du chalumeau; le tube se ferme
et l'on détache le ballon. Vient-
chaude (*fig.* 648), on voit monter
mètre, ce q
verse le vid
2° La chal
verse certain
la chaleur
à distance :
sensation so
pérature ép

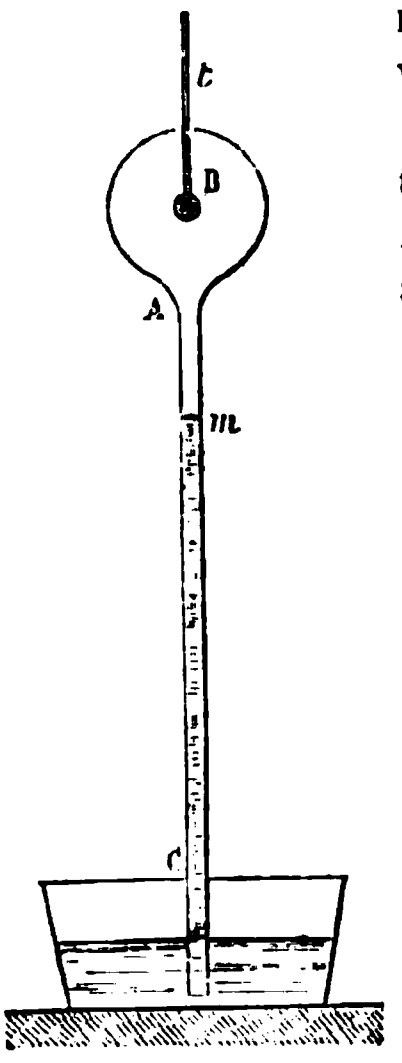


Fig. 647.

nous, car, ainsi que l'a observé
échauffées au contact du foyer
trent pas dans l'appartement. –
chaleur émise par un boulet ro
un thermomètre placé de l'aut
d'un plateau de verre tournant r
lentille d'eau congelée concentr
sorte qu'on peut enflammer en
combustibles, sans que la glace
chaleur obscure passe égalemen
place d'un côté d'une plaque de
de l'autre côté un thermomètr
élévation de température.

827. **Vitesse de la chaleur**
gue. — La chaleur du soleil no
c'est-à-dire que sa vitesse est d

L'expérience montre que la ch
se propage exactement comme la
d'un point à un autre en suivant
(696). — Cette ligne droite pe

Un *cube métallique* (*fig.* 652), l'aide d'une lampe à alcool pla recouvertes de différentes subs

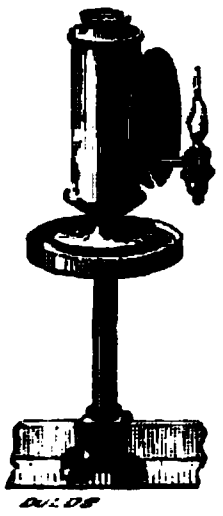


Fig. 649.

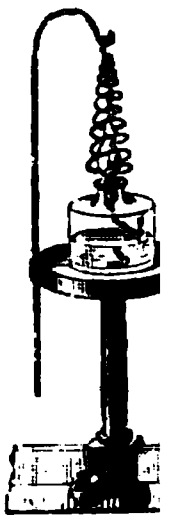


Fig. 65

Les *pièces accessoires* sont : le faisceau calorifique au moye le diamètre ;

Des écrans mobiles à charn cepter les rayons et formés parallèles, séparées par une c

Une tablette (*fig.* 655) sur stances que la chaleur doit tr

Toutes ces pièces, de mêm leur, sont maintenues à la supports de cuivre, que l'on points de la règle métallique

L'*appareil de mesure*, pour n'est autre que le le thermo- cédemment (610), lequel jou sensibilité. La pile thermo-éle logue à ceux des autres pièce 655, et mise en communicati de la figure 412.

Avant d'indiquer l'usage de leur rayonnante, il nous reste teur peut fournir les mesures

830. **Mesure des quan dans l'appareil de Mello** déviations de l'aiguille d'un proportionnelles aux intensit Nous avons vu, d'autre part, q électrique est proportionnell systèmes de soudures, au mo

rayonnée par un corps varie ave
montrer par l'expérience, on op
En C (*fig.* 655), on place le cu
recouvertes de diverses substan

c

Fig 655.

duite de noir de fumée ; une a
est métallique et polie, etc. La
mité de la règle AB. L'écran E,
teur, limite le faisceau inciden
des faces du cube qui est couve
et on relève l'opercule de la pi
nomètre se met en marche, os
fixer à un certain nombre de
la déviation *d* ainsi obtenue. C
relève l'écran D et l'on attend
part. — On tourne vers la pile
que par exemple, et l'on recon
d' de l'aiguille est beaucoup
qu'une surface couverte de n
coup plus de chaleur qu'une s
rature.

832. **Pouvoirs émissifs** d'appeler *pouvoir émissif* d'un *qu'il émet à la quantité de ch température*. — Ce rapport p l'autre les quantités de chale dans les expériences comme c ainsi qu'ont été obtenus les no

Blanc de céruse	1,00	Platine laminé.	0,11
Colle de poisson	0,91	Cuivre en feuilles. . . .	0,35
Encre de Chine.	0,85	Or en feuilles.	0,01
Gomme laque.	0,72	Argent poli.	0,025

La faiblesse du pouvoir émissif des métaux polis justifie l'emploi que l'on fait de vaisselle métallique, pour conserver chauds les mets, le thé, etc. On se sert également de vases métalliques dans les recherches de physique, toutes les fois qu'on veut ralentir le plus possible le refroidissement des corps qu'ils contiennent.

* 833. **Variations du pouvoir émissif d'une même substance, avec la densité de sa surface.** — Pour un même corps, le pouvoir émissif diminue quand la densité des couches superficielles augmente.

Ce résultat, auquel on est conduit par des expériences analogues à celles qui précèdent, permet de concilier facilement les deux faits suivants, qui semblent d'abord contradictoires, et qui ont été signalés par Melloni. Quand on vient à frotter, avec du papier de verre, une lame d'argent laminé, et une lame d'argent fondu, l'expérience montre qu'on augmente le pouvoir émissif de la première, et qu'on diminue le pouvoir émissif de la seconde. — C'est que, sur la première, le frottement, en enlevant les couches superficielles qui ont été très-fortement comprimées par le laminoir, met à nu des couches moins denses; sur la seconde, au contraire, le frottement augmente la densité des couches superficielles et diminue ainsi leur pouvoir émissif.

834. **Du refroidissement. — Loi de Newton.** — Quand un corps est placé dans une enceinte dont la température est inférieure à la sienne, il se refroidit graduellement et finit par se mettre en équilibre de température avec l'enceinte. Ce refroidissement n'est pas dû au rayonnement seul : la couche de gaz qui enveloppe le corps lui enlève de la chaleur par contact, et, les couches échauffées étant incessamment remplacées par des couches nouvelles, la présence du gaz constitue ainsi une cause permanente d'abaissement de température.

Ainsi, si l'on place, au milieu d'un ballon entouré de glace fondante, un thermomètre échauffé préalablement à 100°, et si l'on observe le temps qu'il met à se refroidir de 100° à 10°, l'expérience montre que ce temps est moindre quand le ballon est plein d'air que quand il est plein d'hydrogène, et que le temps est moindre encore quand le ballon est vide. — Donc la présence des gaz a pour effet d'*accélérer* le refroidisse-

(*) La première colonne de ce tableau est due à Melloni ; la seconde, à MM. de la Provostaye et P. Desains, qui ont apporté, dans la détermination des pouvoirs émissifs des métaux, des précautions nouvelles dont la nécessité avait échappé à Melloni.

ment, et la grandeur de l'effet pr
même.

De ces remarques, il résulte qu
jours un phénomène très-complex
foule de causes, notamment de la
voir émissif, de la température
qu'elle renferme. — Cependant, c
ment peut être considéré comme
vante, énoncée par Newton :

Pour un même corps, et lorsque l'enceinte ne dépasse pas 20 *ou* 3 *respondants à des intervalles de te nels aux excès moyens pendant ce*

* 835. **Vérification expéri**
loi précédente conduit à une con
tale peut être considérée comme

Imaginons qu'un thermomètre
surpasse de t degrés celle de l'
t'', etc., les excès de sa tempér
une, deux, trois, etc., minutes.

ment de température est de t —

grés; pendant la deuxième, l'a
$\frac{t'+t''}{2}$, et ainsi de suite. Si la

un rapport constant entre les a
moyens correspondants, c'est-à-
un nombre constant :

$$t -$$

$$t' -$$

De la première de ces équation

$$t$$

de la seconde, on tirerait de n

$$t$$

et ainsi de suite. — Les excès
mer une suite de nombres t
dent multiplié par un facteur

partie dans toutes les directions poss
logue à celui que présentent les mên
stitue la *réflexion irrégulière* ou la *di*

Ainsi, en remplaçant la plaque m
couverte de blanc de céruse, on con
quantité de chaleur reçue, quelle qu
la règle lH qui la supporte.

Pour le blanc de céruse, le papier
fusif, c'est-à-dire le rapport entre la
direction déterminée et la quantité
nature de la source d'où émanent le

840. **Transmission de la ch
certaines substances. — Réfra**
que la chaleur peut traverser certa
les corps transparents. Melloni dés
stances diathermanes, c'est-à-dire
nomme *athermanes* celles qui arr
dente, c'est-à-dire qui sont opaque

Les rayons calorifiques, lorsqu'il
milieu diathermane, éprouvent, c
changement de direction; c'est ce
leur. — Cette réfraction est soumi
mière (732), c'est-à-dire que le ray
dence, et que le rapport du sinu
l'angle de réfraction est constant p

C'est cette déviation imprimée au
ces réfringentes qui permet de conc
ple, au moyen d'une lentille sph
même avec une lentille d'un pet
derrière la lentille une concentr
mer l'amadou ou le drap, et mêm

841. **Décomposition de la c**
qu'on répète avec un prisme de sel
avons constaté la décomposition d
substitue, à l'écran qui servait à
petite pile thermo-électrique que l
à explorer, les unes après les aut
des rayons lumineux, on constate
leur graduellement croissantes,
rouge R. Si même on continue à
le prolongement du spectre lumi
des rayons calorifiques, mais ave
sante, dans une étendue RO, à pe

Le faisceau calorifique a donc

ver directement le faisceau calorifiqu
déviation, qui fait connaître la quantit

On appelle *pouvoir diathermane* d'un
de nature déterminée, *le rapport ent*
et la quantité de chaleur incidente.

L'expérience montre que le sel gen
de la chaleur qu'il reçoit, quelle qu
partent les rayons. L'expérience monti
0,08 de la chaleur incidente, n'augme
que : elle ne peut donc être attribuée
le sel gemme, mais seulement aux r
deux faces. — Le sel gemme est do
thermane, pour toute espèce de chale

Pour d'autres substances, la propo
même plaque varie considérablement
peut juger par les résultats suivants,
d'égale épaisseur :

NOMS DES SUBSTANCES.	LAMPE DE LOCATELLI.
Sel gemme.	0,92
Fluorure de calcium . . .	0,78
Spath d'Islande.	0,59
Verre.	0,59
Cristal de roche.	0,57
Acide citrique.	0,11
Alun	0,09
Glace bien pure.	0,06

Au premier abord, il semble ressc
cune corrélation entre la transparen
glace, substance transparente pour la
pour la chaleur de la lampe, et co
des autres sources ; le sel gemme, a
transparence absolue, laisse passe
chaleur.

Mais l'analogie entre la chaleur
ment, quand on étudie, non pas la t
leur *hétérogène* qui sont émis par le
sibilité propre des divers faisceaux *h*
décomposer. — Pour cela, MM. Ma
solaire, formé par un prisme de sel
petite ouverture, En élevant ou en a

mée par l'existence de rayons de chaleur sans lumière, car il n'est pas absurde de supposer que l'organe de la vue, s'il était constitué d'une manière un peu différente, pourrait être impressionné par ces rayons, comme il l'est par les rayons lumineux.

844. **Absorption de la chaleur rayonnante.** — Quand un faisceau de rayons calorifiques rencontre un corps, nous avons vu qu'une portion de la chaleur est en général réfléchie, soit régulièrement, soit irrégulièrement ; qu'une autre portion traverse le corps, s'il est diathermane ; une troisième portion est *absorbée* par le corps, et se manifeste par l'élévation de température ou les changements d'état qu'elle produit.

On appelle *pouvoir absorbant* d'un corps, pour un faisceau calorifique de nature déterminée, *le rapport entre la quantité de chaleur absorbée et la quantité de chaleur incidente.*

1° *Pour les substances diathermanes*, ce rapport, qui dépend à la fois, de la nature de la substance et de celle de la source calorifique, augmente avec l'épaisseur, mais seulement jusqu'à une certaine limite. — Ainsi, Melloni a constaté qu'un faisceau parallèle AB (*fig.* 659), émané d'une lampe de Locatelli, s'affaiblit beaucoup en traversant une première lame

Fig. 659.

de verre L, de 12 millimètres d'épaisseur ; mais si, au sortir de cette lame, on le reçoit sur une seconde L', faite du même verre, il n'y perd plus que les 0,08 de sa chaleur, quelle qu'en soit l'épaisseur *mn*, *mn'*, *mn''*, etc. Ce résultat montre que la première lame, qui n'est diathermane que pour la chaleur lumineuse (842), arrête toute la chaleur obscure contenue dans le faisceau émis par la lampe; le faisceau calorifique, après son passage au travers de cette lame, n'est donc plus formé que de chaleur lumineuse ; dès lors, la seconde L' ne lui fait plus éprouver que l'affaiblissement dû aux réflexions sur les deux surfaces, affaiblissement ne dépend pas de l'épaisseur de cette lame (*).

(*) C'est là encore un fait analogue à celui qui se produit pour l'absorption de la lumière par les corps transparents *colorés*. Une lame de verre bleu faisceau de lumière blanche, lui fait éprouver un affaiblissement absorbant toute la portion de lumière qui a une couleur autre qu

déduire de celle des autres éléments connus. — En effet, la chaleur absorbée représente l'excès de la chaleur incidente sur la chaleur réfléchie et diffusée. Désignons par 1 la quantité de chaleur que la surface reçoit dans un temps déterminé; par r, d, a, les fractions de cette chaleur qu'elle réfléchit, diffuse et absorbe dans le même temps, c'est-à-dire ses pouvoirs réflecteur, diffusif et absorbant. On a évidemment :

$$1 = r + d + a,$$

d'où

$$a = 1 - (r + d).$$

Si l'on considère, en particulier, le noir de fumée bien mat, l'expérience a montré que les pouvoirs réflecteur et diffusif sont presque inappréciables ; la quantité a est alors sensiblement égale à l'unité, c'est-à-dire que le noir de fumée absorbe *à peu près intégralement* toute espèce de chaleur incidente. Comme il est d'ailleurs le seul corps qui jouisse de cette propriété, on voit que, dans les expériences, il est indispensable de recouvrir de noir de fumée celles des faces de la pile qui doit recevoir la chaleur rayonnante.

Pour les métaux bien polis, la diffusion à la surface est négligeable ; on a donc sensiblement

$$a = 1 - r ;$$

en sorte que le pouvoir absorbant est complémentaire du pouvoir réflecteur.

Pour les surfaces mates, telles que le blanc de céruse, le papier, les métaux dépolis, etc., c'est au contraire le pouvoir réflecteur proprement dit qui doit être considéré comme nul, et l'on a

$$a \doteq 1 - d \text{ (*)}.$$

Enfin, pour les surfaces imparfaitement polies, qui réfléchissent une partie de la chaleur incidente et en diffusent une autre partie, le pouvoir

l'on reçoit le faisceau émergent sur une autre lame de verre L' de même couleur, elle ne lui fait plus éprouver qu'un affaiblissement peu considérable, dû aux réflexions sur les deux faces, et indépendant de son épaisseur.

(*) On ne possède aucune méthode expérimentale propre à la détermination des pouvoirs diffusifs ; mais, comme on sait que la proportion de chaleur diffusée par une même surface varie beaucoup avec la nature de la source (859), on est conduit à penser que la proportion de chaleur absorbée doit varier aussi avec la nature de la source dont elle provient. — Cette conséquence peut être facilement vérifiée par l'expérience suivante. On couvre de noir de fumée l'une des faces de la pile thermo-électrique, on couvre l'autre de blanc de céruse; puis on les expose, tour à tour et à la même distance, au rayonnement d'un cube rempli d'eau bouillante. Le galvanomètre donne des déviations égales dans les deux cas. On répète ensuite les mêmes expériences en remplaçant le cube par une lampe d'Argand ; cette fois, la déviation due à l'absorption par le noir de fumée est supérieure à celle qu'on obtient en recevant les rayons sur le blanc de céruse. (Melloni.)

absorbant dépend de toutes les circor
voir réflecteur, soit le pouvoir diffusi

845. Égalité des pouvoirs ém

de la discussion précédente que le
pour les corps dont le pouvoir diff
de l'unité le pouvoir réflecteur. Tel e

Or, si l'on compare, pour ces corp
nus avec les pouvoirs émissifs des m
de fumée (832), on trouve deux séri
les corps dépourvus de pouvoir diffu
pouvoir émissif; toutefois, cette éga
émise et la chaleur absorbée sont de

Pour les substances douées d'un
absorbants n'ont pu encore être dé
staté que toutes les circonstances qu
l'inclinaison, la densité des couches
le même sens le pouvoir absorbant.
à ces substances le principe de l'ég
cipe n'a pu être jusqu'ici vérifié pa
particulier, celui des corps dépourvu

846. Hypothèse de l'équilib

Lorsque, dans une enceinte dont le
rature, on introduit un corps à une
dit jusqu'à ce qu'il y ait égalité de
De même, un corps froid, placé da
s'échauffe jusqu'à ce que l'équilibre

Ces faits d'expérience pourraient
le premier cas, le corps a d'abord
ceinte, par rayonnement, mais qu
corps et les parois ont atteint des
cas, ce serait au contraire l'enceint
le corps, tant qu'elle aurait été à u
Toutefois, il est peu rationnel de
priété d'émettre la chaleur soit ain
objets environnants, et que cette
cela seul que les objets qui l'ent
supérieure à la sienne. Il est plus
chaleur à toute température, mai
température est plus élevée. Dans
les phénomènes, le rayonnement
une propriété absolue : si un corp
objets environnants plus de chaleu
qu'il reçoit plus qu'il ne perd. L'é
atteint par plusieurs corps placés

de cire fondue : quand la cire est solidifiée, on verse dans la caisse de l'eau bouillante. La chaleur se propage dans les tiges; on juge de leur conductibilité plus ou moins grande par la distance à laquelle la fusion de la cire se propage dans le même temps. — L'expérience ainsi faite montre que les métaux sont incomparablement meilleurs conducteurs que les substances non métalliques; on constate, par exemple, que la cire fond jusqu'à l'extrémité de l'argent, tandis que la fusion se propage à peine jusqu'à une distance de quelques millimètres sur le bois. L'ordre des conductibilités est d'ailleurs le suivant :

Argent, Cuivre, Or, Laiton, Zinc, Étain, Fer, Acier, Plomb, Platine, Bismuth,

Verre, Marbre, Porcelaine, Poterie, Charbon, Bois.

* 851. **Principe de la méthode de détermination des pouvoirs conducteurs, ou coefficients de conductibilité.** — Pour arriver à une précision plus grande dans la comparaison des facultés conductrices des divers corps, on a été conduit à la considération d'une quantité numérique, caractéristique de chaque corps, et qu'on appelle son *pouvoir conducteur* ou son *coefficient de conductibilité*.

Pour définir cette expression, considérons un mur homogène indéfini, limité par deux plans parallèles M, M' (*fig.* 661); supposons que les deux faces de ce mur soient maintenues à des températures constantes T et T'. Au bout d'un certain temps, dépendant de l'épaisseur du mur, de sa nature et de la différence de température des deux faces, chaque point intérieur atteint une température déterminée, qu'il conserve ensuite indéfiniment.

Fig. 661.

Cet équilibre une fois établi, il est évident que tous les points d'un même plan P parallèle aux faces sont à une même température. — Il est facile de voir, en outre, que tous les plans parallèles aux faces laissent passer dans un temps donné, par l'unité de surface, une même quantité de chaleur. En effet, soient deux plans P, Q, situés à une distance quelconque des faces extrêmes; supposons, pour fixer les idées, qu'on ait $T > T'$, en sorte que la chaleur se propage de gauche à droite; si l'unité de surface du plan P laissait passer, dans un même temps, une quantité de chaleur plus grande que l'unité de surface du plan Q, il y aurait accumulation de chaleur entre ces deux plans, et la température des points compris entre eux devrait aller en s'élevant. Ce serait l'inverse si le plan P laissait passer moins de chaleur que le plan Q. Donc l'unité de surface

l'hétérogénéité que produit, dans les barres, l'interposition de cavités contenant du mercure.

Voici les coefficients de conductibilité de divers métaux, déduits de ces

Fig. 602. — Appareil de Despretz.

expériences, en représentant conventionnellement par 100 celui de l'argent, qui est le métal le plus conducteur.

COEFFICIENTS DE CONDUCTIBILITÉ DES MÉTAUX.

Argent	100,0	Fer	11,9
Cuivre	77,6	Acier	11,1
Or	53,2	Plomb	8,5
[illegible]	23,6	Platine	8,4
[illegible]	19,0	Palladium	6,3
Etain	14,4	Bismuth	1,8

853. **Conductibilité des liquides.** — Lorsqu'on chauffe un liquide par sa partie inférieure, les portions qui reçoivent les premières l'action de la chaleur se dilatent; leur densité diminuant, elles s'élèvent et sont remplacées par d'autres qui s'échauffent à leur tour. Ainsi s'établissent des courants ascendants de liquide chaud et des courants descendants de liquide froid, qui répartissent la chaleur dans toute la masse. — La production de ces mouvements peut être rendue visible par une expérience simple. Une cloche de verre renversée (*fig.* 603) contient de l'eau dans laquelle on a mis en suspension un peu de sciure de bois; on chauffe cette cloche, sur une portion aussi petite que possible de sa paroi inférieure; on voit alors les parcelles de bois décrire des courbes, qui s'élèvent des points directement échauffés et redescendent en longeant les parois latérales : ces courbes indiquent la direction des courants qui se forment au sein du liquide.

vient à retarder considérablement la propagation de la chaleur dans sa masse.

853. **Applications.** — Les principes qui précèdent ont reçu, dans les arts et dans la vie commune, de nombreuses applications. Nous nous bornerons à indiquer ici quelques-unes des plus importantes.

Lampe de sûreté. — La grande conductibilité des métaux a été utilisée dans la construction des lampes de sûreté, destinées à préserver des explosions du grisou les ouvriers qui travaillent dans les mines de houille. — Lorsqu'on abaisse une toile métallique à mailles serrées sur la flamme d'une lampe ou d'une bougie, la combustion n'a lieu qu'au-dessous de la toile ; les gaz inflammables, en traversant les intervalles des fils, cèdent à ces derniers une grande quantité de chaleur qui se propage en tous sens dans le tissu. La toile métallique refroidit donc rapidement les gaz qui la traversent ; et, quand ceux-ci arrivent de l'autre côté, leur température est inférieure à la température de combustion. — La lampe de sûreté (*fig.* 664), imaginée par Davy et perfectionnée par M. Combes, se compose d'une lampe ordinaire à huile C, surmontée d'un cylindre de verre A qui se termine par une cheminée B de toile métallique. Si un mélange détonant pénètre dans l'intérieur de cet appareil, il prend feu au contact de la flamme, mais la combustion ne peut se propager à l'extérieur. Ordinairement même, en pareil cas, la lampe s'éteint à la suite de la petite explosion qui s'y produit. aussi a-t-on l'habitude de suspendre au-dessus de la mèche un fil de platine enroulée en spirale, qui reste incandescent, même après que la lampe a cessé de brûler ; la faible lueur qu'il répand suffit pour guider l'ouvrier à travers les galeries et lui permettre de sortir de la mine.

Fig. 664. — Lampe de sûreté.

Conservation des températures. — On enveloppe de substances non conductrices les corps qu'on veut préserver du refroidissement : on empêche ainsi la chaleur de se dissiper au dehors. Le bois, la porcelaine sont employés comme enveloppes non conductrices, dans diverses circonstances. — Inversement, les enveloppes qui empêcheraient un corps de se refroidir l'empêchent aussi de s'échauffer, si sa température est inférieure à celle du milieu qui l'environne, car elles s'opposent à ce qu'il lui arrive de la chaleur de l'extérieur. Pour conserver la glace en été, il faut donc la

LIVRE SIXIÈME

MÉTÉOROLOGIE

856. La *météorologie* a pour objet l'étude des phénomènes physiques qui s'accomplissent, soit normalement, soit accidentellement, à la surface de notre globe et dans l'atmosphère qui l'entoure.

Ces phénomènes sont assez complexes, et il est parfois difficile de discerner le degré d'influence de chacune des causes qui les produisent. D'ailleurs, comme il est impossible de faire varier méthodiquement les conditions dans lesquelles ils s'accomplissent, le météorologiste doit se contenter de comparer le plus grand nombre possible d'observations, faites dans des circonstances assez diverses et telles que les lui offre la nature ; ces observations elles-mêmes présentent nécessairement des lacunes, pour les points du globe sur lesquels nous n'avons que des données météorologiques incomplètes. — Nous nous bornerons ici à l'exposé des résultats qui présentent, dans l'état actuel de nos connaissances, un caractère de certitude à peu près complète.

I. — RÉPARTITION DE LA TEMPÉRATURE A LA SURFACE DE LA TERRE

857. **Observations thermométriques.** — Lorsqu'on veut déterminer la température des couches d'air qui sont à une petite distance du sol, on suspend un thermomètre à l'ombre, à une hauteur de 2 mètres environ ; on fait en sorte qu'il soit exposé au nord, et préservé par des écrans du rayonnement des objets échauffés par le soleil.

Le thermomètre à mercure ne peut être employé que dans les contrées où la température ne s'abaisse pas au-dessous de — 40°, point de congélation du mercure; dans les régions polaires, on doit le remplacer par le thermomètre à alcool.

858. **Thermomètres à maxima et à minima.** — Il est souvent intéressant de connaître les limites extrêmes entre lesquelles varie la température d'un lieu, pendant un intervalle de temps déterminé, pendant une journée par exemple : pour ne pas s'assujettir à observer l'instrument d'une manière continue pendant tout ce temps, on a imaginé des thermomètres à *maxima* et à *minima*, qui conservent l'indication de ces températures extrêmes.

Parmi les instruments de ce genre, les thermomètres de Rutherford (*fig.* 665) se recommandent par leur simplicité : ils n'offrent pas une grande précision, mais ils sont commodes pour les observations faites à poste fixe, et n'exigent aucune manipulation pour la détermination des températures. Deux thermomètres A et B sont placés horizontalement et dans deux positions inverses, sur une même planchette. A est un thermomètre à mercure, destiné à fournir les *maxima* : dans le tube, et en dehors du liquide, est un petit cylindre de fer *a*, qui n'est pas mouillé par le mercure, et que nous supposerons d'abord en contact avec le sommet de la colonne : le ménisque convexe pousse devant lui ce cylindre quand la température s'élève, et le laisse en place quand la température s'abaisse. B est un thermomètre à alcool, destiné à fournir les *minima* : au sein même de la colonne liquide, on a placé un petit cylindre d'émail, qui est mouillé, comme le verre lui-même, par l'alcool : le ménisque concave l'entraîne avec lui quand la température s'abaisse, et le laisse en place au sein du liquide quand la température s'élève. — Pour mettre l'instrument en expérience, on abaisse l'un des côtés de la planchette (le côté droit, pour l'instrument figuré ci-dessus), de manière à faire glisser à la fois les deux petits cylindres jusqu'au contact des ménisques; on replace ensuite la planchette de manière que les axes des thermomètres soient horizontaux, et on la fixe dans le lieu où l'observation doit être faite. La position dans laquelle se trouvera, au bout d'un certain temps, l'extrémité droite du cylindre d'acier indique le point le plus élevé qu'aura atteint la température : la position de l'extrémité droite du cylindre de porcelaine indiquera la température la plus basse.

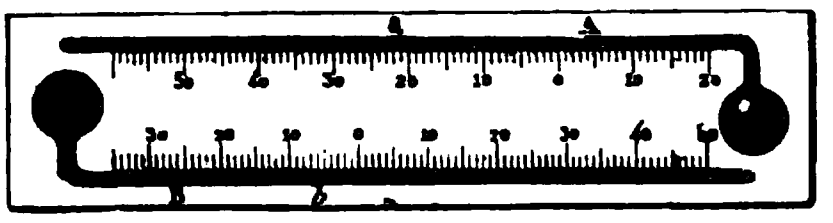


Fig. 665. — Thermomètre de Rutherford.

859. **Températures moyennes.** — On nomme *température moyenne d'un jour*, en un lieu déterminé, la moyenne des températures observées dans ce lieu, d'heure en heure, de minuit à minuit. C'est, comme on le voit, la somme de 24 observations divisée par le nombre 24. — L'expérience a montré que, dans la plupart des cas, la valeur de cette moyenne concorde sensiblement avec celle qui est fournie par trois observations faites, la première au lever du soleil, la seconde à midi, la troisième au

tionnaire. — Puis, jusqu'au coucher du soleil, la température s'abaisse parce que la chaleur émise est supérieure à la chaleur absorbée, et le refroidissement s'accélère encore après que le soleil a disparu. — Enfin le soleil reparaît; au bout de quelques moments, la température remonte, et les mêmes phénomènes se reproduisent.

861. **Variations de la température pendant l'année.** — Si l'on compare entre elles les températures moyennes du jour, aux diverses époques de l'année et pour un même lieu, par exemple pour un point de la France, on observe un minimum dans les premiers jours de janvier, et un maximum dans les premiers jours de juillet.

C'est là encore un résultat facile à concevoir : on sait que, pour notre hémisphère, le rapport de la durée du jour à celle de la nuit est minimum au 21 décembre (solstice d'hiver), et va en augmentant depuis cette époque jusqu'au 21 juin (solstice d'été) ; en outre, entre ces deux époques la hauteur du soleil à midi devient toujours de plus en plus grande. Donc, à mesure qu'on s'approche du 21 juin, la quantité de chaleur reçue par la terre en vingt-quatre heures augmente et la moyenne du jour s'élève ; elle continue encore à s'élever pendant quelques journées après cette époque, tant que la quantité de chaleur absorbée est supérieure à la quantité de chaleur émise. — A partir des premiers jours de juillet, la moyenne du jour s'abaisse, parce que la quantité de chaleur reçue en vingt-quatre heures décroît de plus en plus, et cet abaissement se continue quelques jours encore après le 21 décembre.

862. **Délimitation des saisons météorologiques.** — On considère, en météorologie, le mois le plus chaud, c'est-à-dire le mois de juillet, comme le milieu de l'été : alors l'*été*, au lieu d'avoir les limites assignées en cosmographie, savoir le 21 juin et le 21 septembre, comprend les mois de *juin*, *juillet*, *août*. — De même le milieu de l'hiver est formé par le mois de janvier, et l'*hiver* comprend les mois de *décembre*, *janvier*, *février*. — Le *printemps* et l'*automne* comprennent chacun les mois intermédiaires entre les deux autres saisons.

Cela posé, si l'on prend, en un lieu déterminé, la moyenne des trois mois de l'été, pendant plusieurs étés consécutifs, la moyenne des moyennes ainsi obtenues constituera ce qu'on nomme la *température moyenne de l'été* pour ce lieu. — On obtiendra de même la *température moyenne de l'hiver*, pour un lieu déterminé.

863. **Lignes représentant la distribution des températures à la surface du globe.** — Pour rendre facilement saisissable la distribution des températures moyennes à la surface du globe, de Humboldt a eu l'idée de construire sur la sphère des lignes qui réunissent les points présentant des valeurs égales pour les moyennes de même espèce. — On a construit jusqu'ici trois systèmes de lignes :

1° Les *lignes isothermes* (ἴσος, égal; θερμός, chaleur), qui réunissent les points offrant la même température moyenne de l'année ;

Ces lignes offrent, le plus souvent, des formes irrégulières, comme le montre la figure 666, qui représente ces trois systèmes de lignes en Europe, tracés pour les températures successives de 5 en 5 degrés. Nous indiquerons plus loin comment on peut se rendre compte de ces irrégularités; voyons d'abord quel parti on peut tirer de la comparaison de ces lignes entre elles.

864. **Climats.** — On nomme *climat* d'un lieu l'ensemble des conditions météorologiques auxquelles ce lieu est soumis dans l'intervalle d'une année.

Si nous nous bornons, pour le moment, aux conditions de température, on voit immédiatement que la connaissance de la ligne isotherme qui passe au point considéré, ou des lignes isothermes entre lesquelles il est compris, donne la moyenne des températures qui s'y succèdent dans l'espace d'une année. — Mais ce n'est là qu'une notion bien imparfaite, car une même moyenne peut être fournie par des températures qui varient entre des limites extrêmement différentes. Considérons, par exemple, la ligne isotherme de + 10° (*fig.* 666), qui traverse la partie septentrionale de la mer Caspienne, le nord de l'Allemagne, la Hollande, l'Angleterre, et vient passer au sud de l'Écosse. Dans tous les points de cette ligne, la moyenne des températures de l'année est la même : cependant, il s'en faut beaucoup qu'ils offrent, dans le cours de l'année, des températures semblables. En effet, la figure montre que les bords septentrionaux de la mer Caspienne sont compris entre la ligne isothère de + 25° et celle + 20°; qu'ils sont coupés par la ligne isochimène de — 5° : la moyenne de l'été y est donc très-élevée, et celle de l'hiver assez basse. Au contraire, on voit que le sud de l'Irlande est coupé par la ligne isothère de + 15° et par la ligne isochimène de + 5°, en sorte que la moyenne de l'été et la moyenne de l'hiver sont toutes deux des températures modérées, s'écartant peu de la moyenne annuelle. Ces deux régions, situées en Europe aux extrémités d'une *même ligne isotherme*, sont donc dans des conditions de température *essentiellement différentes*. Ces remarques sont d'ailleurs tout à fait générales (*).

On distingue le plus ordinairement trois variétés de climats :

1° Les *climats constants*, pour lesquels la température moyenne de l'été ne présente avec celle de l'hiver qu'une différence très-petite, de 6 à 7

(*) Pour avoir une idée exacte d'un climat, il est souvent utile d'ajouter à ces déterminations celle de la température *maximum* qui survient au moment le plus chaud de l'été, et de la température *minimum* à laquelle le thermomètre peut descendre pendant les jours les plus froids de l'hiver. — Ces températures extrêmes, qui ne sont souvent que passagères et ne font varier que très-peu la moyenne de l'été ou de l'hiver, peuvent avoir cependant sur la végétation une influence capitale, en permettant à certains végétaux d'arriver en quelques jours à maturité, ou en faisant périr subitement ceux qui auraient pu vivre pendant les autres jours de l'année. Cependant elles sont beaucoup moins connues, pour la plupart des points du globe, que les moyennes précédentes.

des points de l'équateur doit être à la fois, 1° *très-uniforme* pendant l'année; 2° *très-élevée* (*). — Lorsqu'on s'éloigne de l'équateur pour s'approcher de l'un des tropiques, les jours cessent d'être égaux aux nuits, excepté au moment des deux équinoxes; mais la différence, sous les tropiques mêmes, ne dépasse pas trois heures aux époques où elle est maximum, c'est-à-dire au moment des deux solstices : le soleil s'élève encore très-haut sur l'horizon. La température de ces points doit donc être, 1° un peu *moins uniforme* qu'à l'équateur; 2° un peu *moins élevée* (**).

2° Les deux *zones tempérées*, situées de part et d'autre de la zone torride : chacune d'elles étant limitée, d'une part par l'un des tropiques, de l'autre par le cercle polaire, c'est-à-dire par le petit cercle situé à 23° 28′ du pôle (ou autrement, à la latitude de 66° 32′). — Pour les points de ces zones, à mesure qu'on s'éloigne des tropiques, la différence des jours et des nuits atteint une valeur maximum d'autant plus considérable, et la hauteur maximum du soleil au-dessus de l'horizon devient d'autant moindre, qu'on s'approche davantage des cercles polaires. L'été *peut encore* être assez chaud, parce que la longueur des jours compense, jusqu'à un certain point, l'obliquité que présentent, même à cette époque, les rayons solaires; mais l'hiver devient froid, parce que l'époque de la durée maximum des nuits coïncide avec celle de l'obliquité maximum des rayons solaires. De là résulte que, en s'éloignant du tropique, on doit rencontrer : 1° une température *de plus en plus variable* pendant la durée de l'année; 2° une température moyenne *de plus en plus basse*. Le climat, d'abord tempéré, devient bientôt excessif, et la moyenne annuelle descend à des valeurs très-faibles (***).

3° Les deux *zones glaciales*, comprises chacune entre l'un des cercles polaires et le pôle correspondant. — Dans ces zones, la durée maximum de la nuit, qui correspond à l'un des solstices, est de vingt-quatre heures pour les points situés sur les cercles polaires eux-mêmes, et devient de plusieurs semaines ou de plusieurs mois à mesure qu'on s'approche des pôles : il est vrai que la durée maximum du jour, qui correspond à l'autre solstice, acquiert les mêmes valeurs, mais le soleil n'atteint jamais au-dessus de l'horizon qu'une faible hauteur. Enfin, aux pôles mêmes, l'année se compose d'une nuit de six mois, et d'un jour de six *mois* pendant lequel le soleil monte lentement au-dessus de l'horizon et n'atteint qu'une hauteur maximum de 23° 28′ à l'époque du solstice. De là résulte

(*) A l'île de Singhapour, dans l'Inde, la différence entre la moyenne de l'été et celle de l'hiver est de 2 degrés, et la température moyenne annuelle est de 26°,7.

(**) A la Havane, dans les grandes Antilles, c'est-à-dire à peu près sous le tropique du Cancer, la différence des moyennes de l'été et de l'hiver est de 5°,6 et la température moyenne annuelle est d'environ 25°.

(***) Aux îles Canaries, la différence entre la moyenne de l'été et celle de l'hiver est d'environ 6°, et la température moyenne annuelle est de 21°,8. — A Bordeaux, la différence entre l'été et l'hiver est près de 16°, et la moyenne annuelle est de 13°,9. — A Stockholm, la différence entre l'été et l'hiver est de 20° et la moyenne annuelle est de 5°,6.

que la température de ces contrées, longues nuits, ne peut atteindre qu' les plus longs jours. C'est la région mites varient un peu avec les saison grande distance des pôles.

866. **Des causes qui modifie pératures moyennes et la rép** et l'atmosphère terrestre satisfaisai de faire sur leur constitution, tou moyennes de température. se conf sphère. Or l'inspection de ces ligne ainsi.— Il est facile d'apercevoir, da sont soumises les différentes contré ces variations : c'est ce que nous all

867. **Influence de la prox côtes. — Climats maritimes** sèdent, pour la chaleur, un pouv moindres que la terre ferme, d'où leurs, elles absorbent ou émettent Elles ont, en outre, une chaleur spé une même quantité de chaleur abso une moindre variation de températu qu'elles absorbent est employée, à des vapeurs à leur surface. — Pou l'échauffement ou le refroidisseme les couches liquides que pour la te

A ces causes, il faut ajouter l'inf sphère, au voisinage des mers, et jours plus abondants près des côte du soleil pendant le jour, et dimin terre par rayonnement pendant la

De là des différences très-grande et celles des mers, sous la même que, en Europe, les lignes isothè baissent vers l'équateur au voisi lignes isochimènes se relèvent ver même latitude, les climats sont b que dans l'intérieur des continents

Ce sont ces remarques qui ont d *maritimes* et *climats continentaux*, mats tempérés et souvent constan sous les mêmes latitudes, des clim entre la température moyenne de à Cherbourg, de 15 degrés à Paris

latitudes de ces points soient sensiblement les mêmes. — Enfin, parmi les climats maritimes, les plus constants sont *les climats insulaires*: aussi, dans les îles de la zone tropicale, la différence entre la température de l'été et celle de l'hiver ne dépasse guère 2 ou 3 degrés.

868. **Des rapports qui existent entre les lignes de température et les limites de certains végétaux.** — On conçoit que, parmi les végétaux cultivés, ceux qu'on sème pour les récolter au bout de quelques mois peuvent arriver à maturité partout où la température moyenne de l'été est assez élevée, quelle que soit d'ailleurs la température de l'hiver. Aussi observe-t-on, par exemple, que la culture des orges, en Europe, est limitée au nord par une ligne voisine de la ligne *isothère* de 10 degrés (*fig.* 666), et celle des froments par une ligne voisine de la ligne isothère de 15 degrés. Les points traversés par ces lignes ont cependant des climats différents, et pendant l'hiver des températures très-inégales. De même, le maïs n'exige guère que deux ou trois mois d'une température un peu élevée, pour arriver à maturation : sa limite de culture se rapproche beaucoup de la ligne isothère de 20 degrés. — Il en est encore à peu près de même de ceux des végétaux vivaces qu'on cultive pour leurs fruits : la culture en est répandue seulement dans les points où ces fruits peuvent arriver à maturité, c'est-à-dire où la température de l'été est assez élevée. Aussi les limites de culture des vignes, des oliviers, de celles des orangers, affectent-elles encore des formes tout à fait voisines des lignes isothères.

Au contraire, les limites de végétation des arbres forestiers dépendent des températures de l'hiver, c'est-à-dire qu'elles suivent les lignes *isochimènes*. — Ainsi la limite de végétation du chêne-vert se rapproche de la ligne isochimène de + 5 degrés ; elle correspond, comme elle, à un latitude assez basse dans les continents orientaux, mais elle s'élève brusquement en arrivant au midi de la France, et suit toute la côte de l'Océan jusque dans la Bretagne. — Des remarques analogues sont applicables aux autres arbres forestiers, dont les limites de végétation s'élèvent d'autant plus en latitude qu'ils peuvent supporter des hivers plus rigoureux.

On voit, en résumé, que l'*ensemble* de la végétation d'une contrée dépend, à des titres différents, des températures de l'été et de celles de l'hiver, ou des lignes *isothères* et *isochimènes* entre lesquelles elle est comprise.

869. **Influence de l'altitude sur la température.** — Les observations thermométriques faites sur les montagnes ou dans les ascensions aérostatiques montrent que la température devient de plus en plus basse à mesure qu'on s'élève davantage au-dessus de la surface du globe. — La loi suivant laquelle s'effectue cette décroissance n'est connue que très-imparfaitement, et elle paraît dépendre de conditions diverses : cependant on a observé, en général, un abaissement de température de 1 degré pour un accroissement de hauteur ou d'*altitude* d'environ 180 mètres.

voisines du sol s'élèvent, en vertu de leur diminution de densité ; ces couches sont remplacées par l'air froid qui afflue des régions voisines. De là un vent qui souffle à la surface du sol, des régions plus froides vers la région considérée, si aucune autre cause n'en vient changer la direction. — A plus forte raison, si, pour une raison quelconque, une quantité considérable de vapeur d'eau vient à se condenser en un point du globe, c'est-à-dire à se résoudre en pluie, il se produit un vide dans l'atmosphère, où l'air des régions voisines afflue encore pour le remplir. — Les vents produits par de semblables causes doivent avoir une *direction inverse de leur sens de propagation*. Si, par exemple, c'est un vent du nord qui prend ainsi naissance, c'est-à-dire si l'air se transporte, à la surface de la terre, du nord vers le midi, ce vent devra se propager progressivement du midi vers le nord. — Les observations météorologiques constatent que les vents présentent en effet souvent ce caractère : en leur assignant la cause que nous venons d'indiquer, Franklin leur a donné le nom de *vents d'aspiration*.

Au contraire, si c'est une dilatation de l'atmosphère, ou la formation d'une grande quantité de vapeur qui refoule les couches d'air voisines, on conçoit qu'il en puisse résulter un vent qui *se propage dans la direction même où il souffle*. — Ces vents, dont l'observation directe a encore constaté la production, ont été désignés par Franklin sous le nom de *vents d'insufflation*.

On voit que, réciproquement, lorsque des observations météorologiques, faites simultanément dans un grand nombre de points, permettent d'assigner nettement les caractères des vents qui se sont fait sentir à une époque déterminée, on peut parvenir à en assigner les causes principales ; on peut même parfois discerner les causes secondaires qui ont modifié, en tel ou tel point, le phénomène général. — C'est là ce qui n'a été possible jusqu'ici que dans un petit nombre de cas.

872. **Vents périodiques. — Brises. — Moussons.** — Parmi les vents périodiques, on peut citer les *brises*, qu'on observe sur les côtes, et qui affectent deux directions différentes dans le cours d'une même journée. — La *brise de mer* souffle le matin, quelque temps après le lever du soleil ; c'est sur cette brise que les marins comptent pour entrer dans les ports. On s'explique la production de ce vent en remarquant que la terre s'échauffe, sous l'influence des rayons solaires, plus vite que la surface de la mer (867) : donc, tant que la température continue à croître, il s'établit au-dessus de la terre une colonne d'air ascendante, qui appelle l'air de la mer. Ce vent d'aspiration se fait parfois sentir en mer à une assez grande distance; dans notre zone tempérée, c'est surtout pendant l'été qu'il est sensible : il commence à diminuer vers trois ou quatre heures du soir, et cesse au coucher du soleil. Alors survient la *brise de terre*, ou brise du soir, qui dure jusqu'au lever du soleil et que les marins utilisent pour sortir du port : la terre se refroidissant plus

vite que la mer, c'est l'air de la côte qui descend, pendant que l'air d mer s'élève pour lui faire place. — Fournet a reconnu, dans les mon gnes, la production de phénomènes analogues, par la différence d'écha fement des sommets et des vallées, aux différentes heures du jour.

Les *moussons* sont des vents périodiques qui règnent pendant six m dans un sens, pendant les six autres mois en sens contraire. — D notre hémisphère, la *mousson de printemps* commence au mois d'av c'est-à-dire à l'époque où la température moyenne de la terre comme à devenir plus élevée que celle de la mer ; aussi est-ce un vent de n qui continue jusque vers le mois d'octobre. A cette époque, survien *mousson d'automne*, qui souffle de la terre, tant que la températ moyenne du sol décroît plus vite que celle des mers. — Dans l'hémisph austral, où les saisons sont inverses des nôtres, les moussons sont ai interverties, c'est-à-dire que la mousson du printemps souffle de la c et que la mousson d'automne souffle de la mer. — La mer des Indes l'un des points du globe où les moussons s'observent avec le plus de n teté. La mousson de printemps vient du sud-ouest, la mousson d'auton vient du nord-est : c'est ce dont on peut facilement se rendre compte la configuration des mers et des continents voisins (*).

875. **Vents constants. — Alizés.** — Les seuls vents constants aient été observés sont les vents alizés, qui soufflent toute l'année dan voisinage de l'équateur, et dont l'influence se fait sentir à une très-gra distance. — Voici comment on peut se rendre compte de la product de ces vents, d'après la théorie qui est due à Halley.

Dans les régions intertropicales, la température moyenne du jour plus élevée que sous les autres latitudes (865) : elle est d'environ 28 grés pendant toute l'année. De plus, les eaux occupant dans cette z une étendue considérable, il se produit en ces points une évaporat extrêmement active. Ces deux causes diminuent le poids spécifique l'air, et déterminent une ascension des couches inférieures, qui sont re placées par de l'air affluant des règions tempérées. Donc, si la terre é immobile, il se produirait à sa surface, sous cette influence, des coura dirigés de chacun des pôles vers l'équateur. — Mais la terre tourne

(*) C'est encore à des causes du même ordre qu'on doit rapporter le *mistral*, souffle dans le midi de la France et qui est un vent du nord-ouest. — On se compte assez facilement de la production du mistral de la Provence : les pla basses et sablonneuses de la Crau, de la Camargue et des bouches du Rhône, échau par le soleil ardent de l'été, déterminent une ascension des couches d'air qui les chent, et un appel continu de l'air des régions voisines. Cet air ne peut venir de l où il est maintenu par la chaîne infranchissable des Alpes : il arrive donc du nor de l'ouest, et en particulier du plateau central de la France. On peut remarquer e que ces masses d'air, qui ont passé sur les hauteurs du Cantal et de l'Auvergn elles se sont refroidies et ont abandonné une partie de leur humidité, arrivent dans les régions plus chaudes, et se trouvent ainsi très-éloignées de leur poin saturation. On conçoit donc que le mistral soit l'un des vents les plus desséch qu'on observe en Europe.

tour de la ligne des pôles, et les vitesses de ses différents point sc d'autant plus grandes qu'ils sont plus rapprochés de l'équateur; d'aut part, l'air qui touche chaque point du globe est animé de la même v tesse de rotation que ce point lui-même. Donc, quand une masse d'a ayant séjourné quelque temps au contact des zones tempérées, a acquis vitesse de rotation de ces régions, et que cet air vient ensuite à affl vers les tropiques, il est animé d'une vitesse de rotation moindre qu celles des points des tropiques; il reste, pour ainsi dire, en retard pa rapport à ce mouvement de rotation, et il paraît souffler en sens invers du mouvement de la terre. Le vent du nord de l'hémisphère boréal es donc ainsi transformé en un vent du *nord-est*, et le vent du sud de l'hé misphère austral en un vent de *sud-est*. — Ces deux vents se rencon trent et se combinent en arrivant sur l'équateur même, et produisent un vent d'*est*.

On voit de plus que, si l'explication précédente est la véritable, il doit exister, outre les courants que nous venons de signaler à la *surface* de la terre, des *contre-alizés supérieurs*, allant de l'équateur vers les pôles : or, ces courants arrivent sur les régions tempérées avec une vitesse *de rota*tion plus grande que celle de ces régions : de là, dans les parties supérieures de l'atmosphère, un vent de *sud-ouest* pour l'hémisphère boréal et un vent de *nord-ouest* pour l'hémisphère austral. — Ces contre-alizés, qui règnent au-dessus des alizés inférieurs, ont pu en effet être constatés, soit par la direction dans laquelle ils transportent les cendres de certains volcans, soit par l'observation directe du vent qui règne au sommet de montagnes élevées, sur le pic du Ténériffe par exemple.

874. **Cyclones. — Ouragans.** — On a depuis longtemps signalé, dans les régions intertropicales, des phénomènes d'une violence extrême, qui ont été désignés sous le nom de *cyclones*. — Un cyclone est produit par un mouvement de rotation rapide de l'air, autour d'un axe à peu près vertical : ce mouvement a lieu généralement de l'est à l'ouest en passant par le nord, pour les cyclones de l'hémisphère boréal ; il s'effectue en sens inverse pour ceux de l'hémisphère austral. En même temps, l'axe de rotation est animé d'un mouvement de translation : il décrit à la surface de la sphère une courbe dont la concavité est, dans notre hémisphère, généralement tournée vers l'est. Enfin, à mesure que le cyclone se transporte, son diamètre augmente, et il peut atteindre finalement une étendue de plusieurs centaines de lieues. — Au centre du cyclone, l'air est relativement calme : mais la vitesse de rotation de la masse d'air devient considérable à une certaine distance du centre de rotation, et atteint celle des ouragans les plus redoutables. D'ailleurs, puisque la rotation est accompagnée d'un mouvement de translation de toute la masse, on conçoit que la vitesse du vent ne doit pas être la même des deux côtés du centre, pour un observateur regardant dans la direction où le cyclone se transporte. D'un côté, elle est la somme de la vitesse de rotation et de la vi-

876. **Variations barométriques.** — Les variations barométriques sont intimement liées aux variations des vents. — On doit distinguer, dans les mouvements de la colonne barométrique, les variations *régulières* et les variations *accidentelles*.

Dans les contrées tropicales, la périodicité des variations barométriques régulières se manifeste avec une grand netteté : chaque jour, la hauteur barométrique atteint deux maxima, qui ont lieu vers dix heures du matin et dix heures du soir, et deux minima, vers quatre heures du matin et quatre heures du soir.

Dans nos contrées, les variations accidentelles rendent ordinairement difficile la constatation des variations régulières. Mais si l'on compare entre elles des moyennes calculées chacune pour une même heure du jour, par des observations continuées pendant plusieurs années, c'est-à-dire si l'on prend la moyenne des observations faites à midi, puis celle des observations faites à une heure, et ainsi de suite, on voit apparaître les variations régulières : on reconnaît ainsi que les maxima et les minima ont lieu à peu près aux mêmes heures que dans les régions tropicales; ces heures changent seulement un peu avec les saisons.

877. **Relations des variations barométriques avec les variations de température et avec les météores aqueux.** — Les variations de la température et les fluctuations qu'elles déterminent dans l'atmosphère sont les causes immédiates des oscillations du baromètre. — On conçoit en effet que si, en un lieu déterminé, l'air vient à s'échauffer jusqu'à une certaine hauteur, les couches ainsi dilatées doivent s'élever dans l'atmosphère, et se déverser ensuite sur les régions voisines : de là, une diminution de pression dans le lieu considéré. — Pour une raison semblable, un vent chaud et humide, au moment où il se fait sentir en un point du globe, fait baisser le baromètre : un vent sec et froid fait monter le baromètre. — On comprend donc qu'il existe, dans chaque contrée, une relation entre les oscillations du baromètre d'une part, les variations journalières de la température et la direction des vents régnants de l'autre.

Dans les régions où les vents offrent tous les caractères d'une parfaite régularité, où le thermomètre n'accuse que des variations régulières, les oscillations de la colonne barométrique doivent présenter le même caractère. Ces conclusions sont pleinement confirmées par les observations faites sous les tropiques.

Dans nos régions, où les variations de la température et celles des vents sont loin d'offrir la même régularité, le baromètre offre également des variations dont les causes ne peuvent être assignées d'une manière absolument satisfaisante. — Il est cependant facile d'apercevoir encore les liaisons qui existent entre les divers ordres de phénomènes. Ainsi, dans nos contrées, les vents humides et chauds du sud-ouest, qui déterminent un abaissement de la colonne barométrique, sont précisément ceux qui

Dès lors, il est facile de se rendre compte des résultats suivants, que nous nous contenterons d'énoncer : — C'est au lever du soleil que l'air est le plus humide, c'est-à-dire le plus voisin de la saturation : cependant c'est à ce moment qu'il contient la plus petite quantité absolue de vapeur d'eau, à cause du ralentissement de l'évaporation pendant la nuit, mais on sait aussi que c'est au lever du soleil que correspond le minimum de la température du jour (860). — Pendant l'été, c'est vers trois heures que l'air est le plus sec ; cependant c'est à ce moment qu'il contient le plus de vapeur d'eau, mais c'est aussi à ce moment qu'il possède la température la plus haute. — De même, dans le cours de l'année, c'est vers la fin de décembre que l'air est le plus humide, c'est vers la fin de juillet qu'il est le plus sec ; et cependant la quantité absolue de vapeur d'eau est beaucoup moindre en hiver qu'en été.

L'observation montre que l'air est rarement saturé de vapeur, même lorsqu'il pleut. A la surface de la terre, l'hygromètre ne descend presque jamais au-dessous de 40 degrés. La moyenne annuelle de ses indications, dans nos climats, est d'environ 72 degrés.

Dans son mémorable voyage aérostatique, Gay-Lussac a constaté une rapide diminution de l'état hygrométrique, à mesure que le ballon s'élevait dans l'atmosphère ; à 7,000 mètres de hauteur, l'hygromètre à cheveu ne marquait plus que 26 degrés, et, bien que la température fut de beaucoup inférieure à zéro, l'air ne contenait que la huitième partie environ de la vapeur nécessaire pour le saturer.

880. **Condensation de la vapeur d'eau atmosphérique à la surface des corps placés sur la terre. — Rosée.** — On donne le nom de *rosée* à ces gouttelettes d'eau qui couvrent, pendant les nuits calmes et sereines, les corps placés à découvert sur la surface du sol.

La théorie suivante, publiée à Londres en 1815 par Wells, rend compte de ce phénomène. — Lorsque le ciel est serein et que le soleil a disparu sous l'horizon, la surface du sol ou les corps qui la recouvrent continuent de rayonner vers les espaces célestes ; la chaleur que ces corps perdent ainsi ne peut leur être restituée par les couches profondes, puisque le sol est mauvais conducteur : leur température s'abaisse donc rapidement. Cet abaissement de température est toujours plus considérable que celui de l'air, dont le pouvoir émissif est beaucoup moindre : en effet, Wells a constaté qu'un thermomètre placé dans le gazon, pendant une nuit sereine, marquait une température inférieure de 7 ou 8 degrés à celle d'un thermomètre suspendu à un mètre au-dessus du sol. De là résulte que la couche d'air qui est en contact immédiat avec la surface de la terre est

celles des pays que nous habitons. Ainsi, par exemple, sur la côte orientale de l'Amérique du Sud, à l'embouchure de la Plata, ce sont les vents du sud-est qui amènent la pluie, en même temps qu'ils déterminent, à cause de leur basse température, une ascension de la colonne barométrique : dans cette contrée, la relation entre l'état du ciel et la hauteur du baromètre est donc inverse de ce qu'elle est chez nous.

quelconque du jour ou de la nuit, un vent humide et un peu chaud vient à souffler : les branches des arbres se couvrent alors d'une couche de glace, qu'on désigne encore quelquefois sous le nom de *givre*, mais dont la production est, comme on voit, tout à fait étrangère au rayonnement nocturne.

882. **Condensation de la vapeur d'eau au milieu de l'atmosphère. — Brouillards. — Nuages.** — On donne le nom de *brouillards* à des amas de vapeur d'eau qui se condensent dans l'atmosphère, au voisinage du sol : cette eau forme alors une multitude de gouttelettes fines, qui donnent à l'air une opacité plus ou moins grande. — Quand ces amas de vapeur condensée occupent les régions plus élevées de l'atmosphère, ils constituent les *nuages*.

Cette assimilation entre les brouillards et les nuages est justifiée par les observations qu'on peut faire dans les pays de montagnes. L'observateur placé dans la vallée voit souvent des nuages courir sur les flancs des montagnes ou en environner le sommet; ces nuages ne sont *que* des brouillards pour ceux qui se trouvent à leur hauteur sur la montagne.

La cause générale qui produit les brouillards ou les nuages est *le refroidissement* d'une masse d'air déjà voisine de son point de saturation. — C'est ce qui arrive, par exemple, à la fin des nuits de printemps et d'automne, dans les vallées qui contiennent des marécages ou qui donnent passage à des cours d'eau : ces eaux ont saturé l'air de vapeurs; cet air se refroidit au contact des flancs de la vallée : il se forme *alors un* brouillard, qui disparaît un peu après le lever du soleil. — On conçoit de même que la vapeur d'eau, qui se dégage pendant le jour du sol échauffé et humide, se condense et forme des nuages en arrivant dans les couches élevées de l'atmosphère, où la température est plus basse — Inversement, mais pour la même raison, lorsqu'un vent chaud et humide vient à souffler sur la mer, ou dans une ville dont un froid prolongé a refroidi les édifices, il y a condensation de la vapeur et formation de brouillards.

Parmi les causes de formation des nuages, M. Babinet a signalé encore le phénomène suivant. Les vents d'ouest qui soufflent en France *se sont* chargés d'humidité en passant sur l'Océan; à mesure qu'ils pénètrent sur le continent, dont les reliefs deviennent de plus en plus saillants, ils arrivent dans les couches atmosphériques plus élevées et par suite plus froides : ils s'approchent donc toujours de leur point de saturation, et peuvent facilement l'atteindre. — Enfin les nuages se forment plus rapidement encore quand ces vents rencontrent des montagnes, dont la cime disparaît alors dans les brouillards qui la couronnent. C'est ainsi qu'un observateur placé dans une vallée profonde peut voir de chaque côté les cimes environnées de nuages, et le ciel parfaitement pur au-dessus de sa tête; puis, si les nuages formés de part et d'autre viennent à se rejoindre, ils arrivent d'ordinaire à se résoudre en pluie.

Il est essentiel enfin de remarquer que le mélange de deux masses d'air

885. **Précipitation de l'eau atmosphérique vers le sol. — Pluie. — Neige. — Grêle.** — Les *nimbus* sont les nuages qui donnent le plus ordinairement la pluie. — Lorsque la condensation de la vapeur est suffisante pour que les gouttelettes d'eau acquièrent un volume un peu considérable, elles tombent par leur propre poids ; leur volume s'accroît en chemin, par la condensation de nouvelles vapeurs, en sorte que les gouttes de pluie sont en général d'autant plus grosses qu'elles viennent d'une plus grande hauteur (*).

Lorsqu'une pluie peu abondante vient à tomber sur la terre après un froid prolongé, l'eau se congèle presque instantanément; elle couvre le sol d'une mince couche de glace, à laquelle on donne le nom de *verglas*. Si la pluie devient plus abondante, elle ne tarde pas à réchauffer les corps qu'elle rencontre, et le verglas disparaît.

La production du verglas peut avoir parfois une cause toute différente. — Il résulte d'observations dues à Fournet que l'eau des nuages et de la pluie peut conserver l'état liquide jusqu'à la température de — 15° environ ; les expériences de M. L. Dufour, que nous avons indiquées (279) montrent que la température de gouttes d'eau, isolées de tout corps solide, peut même être abaissée encore davantage sans qu'il y ait solidification , mais, lorsqu'une goutte d'eau ainsi refroidie vient à toucher un corps solide, la congélation a lieu instantanément. On conçoit donc que le verglas doive être quelquefois attribué à la chute de gouttes d'eau dont la température était inférieure à zéro, et qui se congèlent au moment où elles rencontrent le sol.

La *neige* est de l'eau solidifiée dans les régions élevées de l'atmosphère : chaque flocon est formé par la réunion de petites aiguilles prismatiques de glace, généralement groupées en étoiles régulières ; elles affectent d'ailleurs des formes très-diverses, dont la figure 667 représente quel-

Fig. 667.

ques types. — La neige n'arrive à l'état solide jusqu'à terre, que si l'air est à une température assez basse au voisinage du sol ; dans le cas contraire, elle fond en chemin et se convertit en pluie.

(*) Il arrive assez souvent, à la fin des journées chaudes et humides, qu'il tombe pendant quelques instants une pluie fine, sans qu'il y ait de nuages au ciel. Ce phénomène, connu sous le nom de *serein*, est dû à un refroidissement subit de l'air, après le coucher du soleil.

terminée par une longue pointe métallique T, porte en D un chapeau de laiton qui abrite l'instrument (*).

Si l'électroscope est placé au-dessous d'un corps chargé d'électricité positive, le fluide positif de la tige est refoulé dans les balles de sureau, et le fluide négatif s'écoule par la pointe. L'instrument se charge donc de la même électricité que le corps influent, et la divergence des petites balles, que l'on peut mesurer au moyen d'un arc gradué tracé sur la paroi de la cloche, donne une idée de la charge que possède le corps influent.

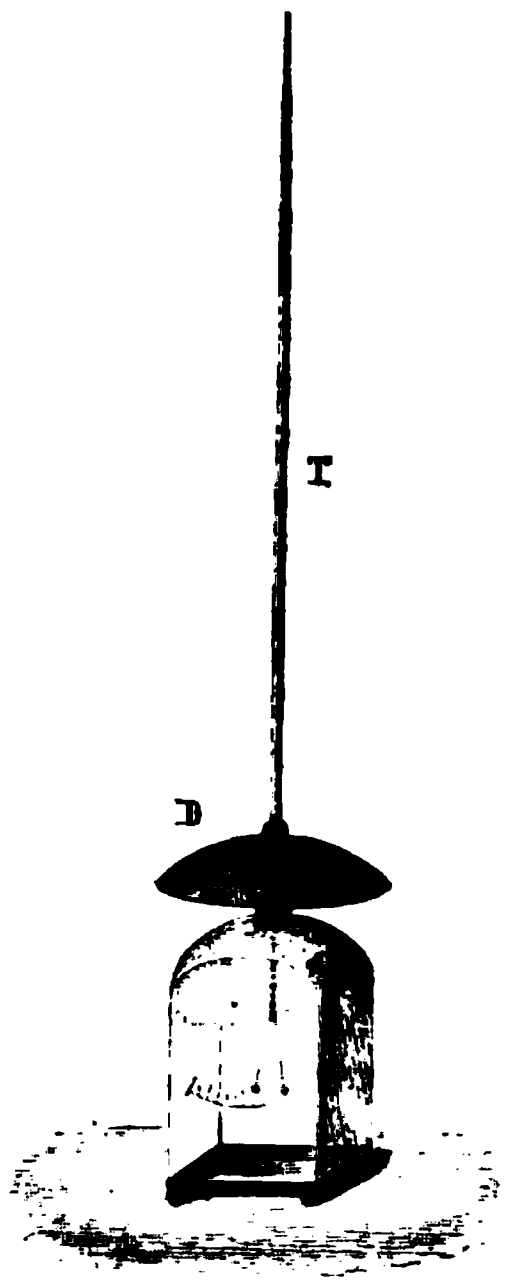


Fig. 668. — Électroscope de Saussure.

Cet instrument, et quelques autres un peu différents, ont permis d'obtenir sur l'électricité de l'atmosphère un certain nombre de résultats, dont nous indiquerons les principaux.

887. **État électrique de l'atmosphère lorsque le temps est serein** — Lorsque le temps est serein, l'atmosphère est toujours chargée d'électricité *positive*. La tension de cette électricité est d'autant plus considérable que le temps est plus pur et plus sec; l'expérience a montré aussi qu'*elle augmente très-notablement à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère*.

Le sol est, en général, électrisé *négativement*, car, lorsque le temps est serein, un électroscope placé sous un arbre, ou dominé par un édifice, acquiert une charge, parfois très-grande, d'électricité négative. — Cette électricité négative du sol peut s'expliquer en remarquant que, si l'électricité positive constatée dans l'atmosphère s'est produite à la surface même du sol, le sol a dû acquérir une charge négative (**). Si l'on admet, au contraire, que l'électricité positive de l'air

(*) On peut augmenter la sensibilité de l'appareil à l'aide de divers artifices. Volta plaçait à l'extrémité de la tige un morceau d'amadou en combustion, ou un corps brûlant avec flamme; les aspérités déterminées dans l'amadou par la combustion, ou les filets très-déliés formés par les vapeurs conductrices de la flamme, constituent autant de pointes aiguës et multiples, qui fonctionnent d'une manière plus parfaite que la pointe métallique.

(**) Le développement de l'électricité a été attribué par Pouillet, soit aux phénomènes de la végétation, soit à l'évaporation des eaux qui couvrent la surface du sol, et qui tiennent en dissolution diverses substances salines. Des expériences directes ont en effet montré que, si l'on fait germer une plante, ou si l'on fait évaporer une solution saline dans un vase métallique isolé, les gaz ou les vapeurs qui se dégagent sont

s'est produite au sein de l'atmosphère, elle a dû agir ainsi par influence sur le sol, et y développer encore de l'électricité négative. Donc, dans les deux hypothèses, le sol doit être chargé d'une électricité contraire à celle de l'atmosphère.

888. **État électrique des nuages.** — La constatation directe de l'électricité des nuages fut le premier rapprochement établi entre les phénomènes électriques de l'atmosphère et ceux que nous produisons artificiellement avec nos appareils. — C'est à Franklin que revient cette découverte; c'est à lui que l'on doit les indications précises de la méthode à suivre pour la confirmer.

Le 10 mai 1752, Dalibard, en se conformant aux indications données par Franklin dans ses Lettres à Collinson, fit élever, dans un jardin de Marly-la-Ville, une barre de fer de 40 pieds de haut, terminée à sa partie supérieure par une pointe d'acier trempé, et fixée sur un support isolant. Il attendit que des nuages orageux vinssent à passer au-dessus de la tige, et put alors constater que la barre acquérait une charge électrique capable de donner des étincelles et des commotions semblables à celles d'une machine électrique puissante. Pour obtenir ces étincelles, on approchait de la barre de fer l'extrémité d'un fil de cuivre, tenu par un manche isolant et communiquant avec le sol par son autre extrémité.

Un mois plus tard, Franklin eut recours à un autre procédé, qui permettait d'aller chercher le fluide électrique jusque dans la région même des nuages. Un cerf-volant fut garni, à sa partie supérieure, d'une pointe métallique communiquant avec la corde qui servait à le maintenir : il fut lancé dans les airs, au milieu d'une plaine voisine de Philadelphie, et Franklin le maintint quelque temps en présence des nuages orageux, après avoir pris soin d'isoler la corde par un cordon de soie. La corde étant peu conductrice, on n'obtint d'abord que des traces douteuses d'électricité; mais, une pluie fine étant venue à mouiller le chanvre et le rendre conducteur, on put obtenir des étincelles de plusieurs pouces. — Enfin, en 1755, de Romas, assesseur au présidial de Nérac, sans avoir connaissance de ces résultats, fit une tentative semblable, dont les effets dépassèrent en puissance tout ce qu'on avait observé jusqu'alors. Une première expérience faite avec un cerf-volant maintenu par une corde ordinaire ne lui ayant donné aucun résultat, il eut l'idée d'enrouler autour de la corde un fil de cuivre. Le cerf-volant fut lancé, et la corde, qui n'avait pas moins de 260 mètres, fut retenue par un cordonnet de soie, fixé lui-même à une pierre très-lourde : un orage violent ayant éclaté, on obtint des lames de feu, qui partaient à plus d'un pied de distance et dont

chargés d'électricité positive, et le vase devient négatif. De nouvelles expériences de Matteucci ont donné des résultats tout à fait semblables. — Toutefois, les conclusions déduites de ces recherches et leur extension aux phénomènes naturels n'ont pas été admises sans contestation : il peut se faire, par exemple, que le frottement joue, dans les expériences que nous venons de citer, un rôle considérable, et qu'on doive même lui attribuer la plus grande part dans le dégagement de l'électricité.

entendait le bruit à plus de deux cents pas : une lueur brillante environnait la corde dans toute sa longueur. — Ces expériences furent répétées de toutes part, et de Romas, en les poursuivant et les perfectionnant, parvint à tirer de la corde des lames de feu de dix pieds de long, dont les explosions produisaient le bruit d'un coup de pistolet.

De semblables décharges sont foudroyantes, et il est indispensable de s'entourer de précautions, pour empêcher qu'elles ne viennent frapper directement l'expérimentateur. Le professeur Richmann, membre de l'Académie des sciences de Saint-Pétersbourg, avait fait élever sur le haut de sa maison une tige semblable à celle de Dalibard; des conducteurs métalliques isolés traversaient le toit et venaient aboutir jusque dans son cabinet de physique : le 6 août 1753, pendant un violent orage, au moment où il se préparait à mesurer l'intensité de la charge acquise par ses conducteurs, il s'approcha par mégarde de l'un d'eux : la décharge l'atteignit au front, et la mort fut instantanée. — Lorsqu'on veut aujourd'hui expérimenter sur l'électricité des nuages orageux, on a soin d'environner les conducteurs d'une enceinte formée par des piquets métalliques, plantés dans le sol, et de se tenir toujours en dehors de cette enceinte. Si la décharge éclate spontanément, elle vient frapper l'un des piquets, et l'expérimentateur est à l'abri du danger.

889. **Nuages positifs et négatifs.** — L'électricité des nuages est tantôt positive, tantôt négative. D'après ce que nous savons déjà de l'électricité dans l'atmosphère pendant les temps calmes (887), l'un et l'autre résultat est facile à expliquer.

S'il arrive en effet que, par un ciel serein, la vapeur d'eau répandue dans l'atmosphère se condense, de manière à former un nuage, elle emprunte à l'air auquel elle est mélangée son électricité *positive*.

Au contraire, si un nuage reste pendant quelque temps au contact des flancs d'une montagne, ou s'il se forme à la surface d'une masse d'eau possédant la même électricité que le sol, ce nuage s'électrise *négativement*. — Enfin la charge négative de certains nuages peut encore tenir à une autre cause. Nous avons vu que la tension positive de l'atmosphère va en croissant à mesure qu'on s'élève dans l'air; si donc il arrive que deux couches de nuages soient superposées, les nuages supérieurs, plus fortement chargés d'électricité positive, peuvent agir par influence sur les nuages inférieurs; ces derniers abandonnent leur électricité positive à l'air qui les environne, et se chargent d'électricité *négative*.

890. **Éclairs. — Tonnerre. — Coups de foudre.** — S'il arrive que deux nuages chargés d'électricités contraires s'approchent assez l'un de l'autre pour que la tension de leurs fluides puisse vaincre la résistance de l'air qui les sépare, il éclate entre eux une étincelle résultant de la combinaison de ces fluides. — De même, si un nuage électrisé arrive assez près de la terre, il décompose par influence les fluides du sol, et peut déterminer une étincelle qui éclate entre le nuage et le sol.

être attribué à deux causes principales. En premier lieu, les échos formés soit par les objets situés à la surface de la terre, soit par les nuages eux-mêmes, peuvent nous renvoyer le même son plusieurs fois, et avec des intensités différentes. En outre, une même décharge peut se propager entre des nuages successifs : elle doit alors être considérée comme formée d'une série de décharges, qui partent *au même moment* comme les étincelles du tube étincelant (473), mais qui se produisent à des distances très-différentes de notre oreille. Les bruits de ces différentes décharges doivent donc mettre des temps très-inégaux pour nous parvenir, et ils doivent en outre nous arriver avec des intensités très-variables.

893. La foudre, lorsqu'elle frappe la terre, doit se produire de préférence entre les nuages et les points du sol où le fluide attiré peut acquérir la plus haute tension. Si donc on se reporte à ce que nous avons dit de l'influence de la forme des corps sur la distribution de l'électricité, on voit que la foudre doit frapper presque toujours les points de la surface du sol qui forment des saillies par rapport aux points environnants. — Les sommets des hautes montagnes, les édifices élevés, les clochers de nos églises, les arbres isolés au milieu des plaines, sont les points que la foudre vient le plus souvent atteindre. Aussi n'est-ce jamais dans leur voisinage qu'on doit chercher un abri dans les temps orageux, ni au voisinage de corps conducteurs un peu volumineux, tels que des masses métalliques considérables, sur lesquelles les actions d'influence opèrent une décomposition plus rapide des fluides électriques.

894. **Effets physiques ou chimiques produits par la foudre.** — Les phénomènes produits par la foudre diffèrent surtout de ceux de nos machines électriques par leur intensité, qui accuse une tension énorme et une quantité considérable de fluides intervenant dans la décharge.

On cite des exemples de coups de foudre, enlevant les toitures des bâtiments, arrachant les pierres et les projetant à une grande distance, traversant des plaques épaisses de verre, ou déchirant en filaments le tronc des arbres. — Ce sont là des *effets mécaniques*, semblables à ceux que produisent nos batteries (465), mais d'une intensité incomparablement plus grande.

La foudre produit aussi sur son passage des *effets calorifiques* considérables; elle rougit, fond ou volatilise les corps conducteurs, comme les fils de sonnettes ou les dorures des appartements; lorsqu'elle tombe sur des meules de paille ou sur des amas de matières combustibles, elle y détermine des incendies. Quand elle vient frapper les couches de sable quartzeux qui constituent le sol de certaines contrées, elle peut fondre le sable lui-même et former, avec les grains agglutinés, des tubes auxquels on donne le nom de *fulgurites*.

Des masses de fer ou d'acier peuvent être aimantées par un coup de foudre : les pôles des aimants sont souvent déplacés ou intervertis. Des

propriétés analogues se retrouvent, avec une décharges de nos appareils (582).

Quant aux *effets chimiques* de la foudre, il ceux des étincelles tirés des machines élec contiennent des proportions notables d'acide berté, soit plus souvent à l'état d'azotate d'am staté (474) que le même effet se produit qu d'étincelles dans un mélange d'azote et d'o solution alcaline.

895. **Effets physiologiques de la fou** — Les commotions déterminées chez les anim puissantes que celle de la foudre peuvent oc plus graves, et parfois amener instantanémen

Les traces que laisse la décharge dans c variables : tantôt elle détermine des brûlures tantôt, au contraire, elle ne produit aucune observe une congestion au cerveau et un épa vaisseaux. On a remarqué du reste que, dans extrait des veines a perdu sa coagulabilité.

Enfin, il est des circonstances où la décha mortelle pour des animaux que la foudre n'a Supposons qu'un nuage fortement électrisé, lectricité positive, passe lentement à une p compose par influence le fluide neutre des ol la terre, attire le fluide négatif et repousse où cette influence communique une charge

y sont soumis, s'il arrive que le nuage se d autre point du sol, il s'opère une recompos triques dans les corps influencés. L'expérien tion produite alors dans les animaux peut êt miner instantanément la mort. C'est le phén le nom de *choc en retour*.

896. **Paratonnerres.** — C'est encore à indiqué l'emploi des pointes métalliques pour préserver les bâtiments des ravages de

Lorsqu'on approche d'une machine élect métallique tenue à la main (*fig.* 669), la ma nière continue, et il est presque impossibl résulte, en effet, de tout ce qui a été dit neutre de la tige et du corps humain est dé si la machine fournit de l'électricité positi chappe par la pointe A et vient continuell l'état naturel. Tout se passe donc comme si de la machine, pour la conduire dans le s

qu'on retrouve dans les écrits de Franklin, *le fluide électrique est attiré par les pointes :* énoncé exact, si on le considère comme exprimant sim-

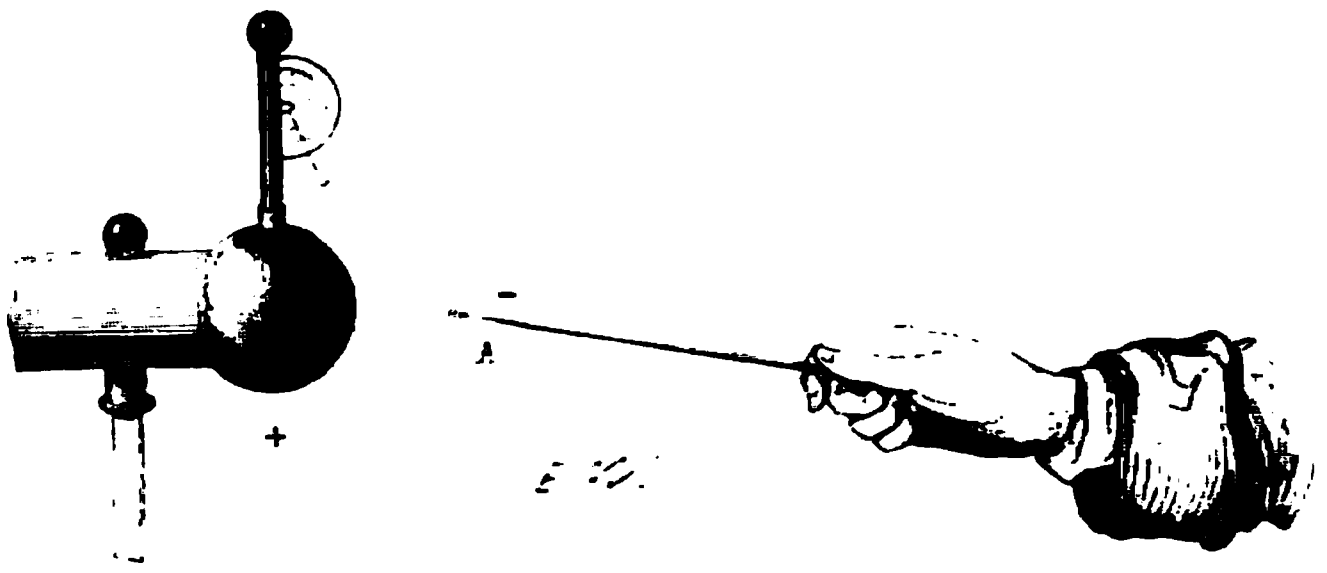


Fig. 669.

plement le résultat définitif, mais qui, dans la théorie actuelle, correspond à un phénomène un peu plus complexe.

Quoi qu'il en soit, Franklin eut l'idée d'essayer si la foudre aurait aussi la propriété d'*être attirée par les pointes :* ce fut là l'origine des expériences qui établirent la ressemblance entre la foudre et les phénomènes électriques ordinaires (888). Franklin pensa alors que, si les *parties élevées* de nos bâtiments étaient armées de pointes métalliques, et si la communication entre ces pointes et le sol était bien établie, les pointes devraient préserver les monuments des éclats de la foudre. Ces conclusions sont aujourd'hui confirmées par l'expérience universelle.

897. **Construction et établissement des paratonnerres.** — Les paratonnerres ont été l'objet de nombreuses modifications, dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici. En 1823, l'Académie des sciences publia une *instruction sur les paratonnerres*, dont les conclusions furent généralement adoptées en Europe ; en 1854, consultée à l'occasion *du Palais* de l'industrie et des nouvelles constructions du Louvre, elle chargea la Section de physique d'étudier de nouveau la question, et les modifications à apporter à l'*instruction* de 1823 furent l'objet d'un rapport qui fut rédigé par Pouillet. Enfin deux autres rapports faits, depuis cette époque, par la même commission, sont venus compléter les indications qui peuvent rendre l'établissement des paratonnerres absolument pratique.

Un paratonnerre doit se composer d'une tige métallique, ayant de 5 à 10 mètres de longueur, et de 5 à 6 centimètres de diamètre à sa base. La plus grande longueur TT de cette tige (*fig.* 670) est en fer ; d'après les conclusions données par l'Académie en 1823, elle devait se continuer en haut avec une *baguette de cuivre* d, *à laquelle était soudée une pointe de platine* P. Le rapport de 1854 substitue, à cette tige de cuivre et à la pointe de platine, un *cylindre de cuivre rouge* m (*fig.* 671) terminé par un cône *n ;* ce cylindre est adapté à vis sur la tige de fer, et soudé avec elle. La

soit frappé de la foudre : l'écoulement de l'électricité attirée vers la pointe de la tige est manifesté par une aigrette lumineuse, visible dans l'obscurité. — Si le paratonnerre est frappé, l'électricité s'écoule dans le sol par le conducteur, sans occasionner de dégâts sur son passage. Il arrive parfois seulement que certaines portions du conducteur soient détériorées, ou que la partie supérieure de la pointe soit fondue ; on en est quitte alors pour une réparation, qu'il est d'ailleurs indispensable de faire si l'on veut que le paratonnerre conserve son efficacité.

V. — VARIATIONS DU MAGNÉTISME TERRESTRE.

899. **Variations de la déclinaison et de l'inclinaison magnétiques en un même lieu.** — La déclinaison et l'inclinaison magnétiques varient, en chaque point du globe, d'une manière incessante. Ces variations sont connues surtout pour la déclinaison ; elles sont *de trois* sortes :

1° *Variations périodiques de la déclinaison.* — Dans nos climats, où la déclinaison est occidentale, on voit l'extrémité australe de l'aiguille marcher vers l'ouest pendant la matinée : la déclinaison atteint son maximum vers le moment où la température est elle-même maximum ; elle diminue alors, et atteint son minimum pendant la nuit : à partir de ce moment, l'extrémité australe marche de nouveau vers l'ouest, et ainsi de suite. Ces variations, qui sont, dans nos contrées, de 12′ à 13′ en moyenne, portent le nom de *variations diurnes ;* elles sont à peu près *constantes* d'un jour à un autre jour *voisin*, dans un même lieu. — Les observations, continuées pendant le cours de l'année, montrent que l'aiguille offre, par rapport à sa position moyenne, un maximum d'écart dans la saison chaude et un minimum dans la saison froide : ainsi, à Paris, l'amplitude de la variation diurne, qui atteint environ 15′ pendant l'été, descend à 8′ environ pendant l'hiver. Ce sont les *variations annuelles*, qui sont peu différentes d'une année à une autre année *voisine*.

2° *Variations séculaires de la déclinaison.* — Si l'on évalue en *un lieu* la déclinaison moyenne de l'année, et si l'on compare entre elles les moyennes de plusieurs années successives, on constate une variation qui a reçu le nom de *variation séculaire*. Des observations faites à Paris, depuis l'année 1580, ont conduit aux résultats suivants : en 1580, la déclinaison était orientale et égale à 11° 30′ ; la déclinaison moyenne annuelle a été en diminuant depuis cette époque, jusqu'en 1663 où elle est devenue d'abord nulle, puis occidentale et toujours croissante jusqu'en 1814 ; en 1814, elle a atteint un maximum égal à 22° 54′, et a commencé à décroître successivement : actuellement, elle est encore dans cette *période*

décroissante, et, en 1871, la déclinaison occidentale moyenne a d'environ 17° 40′ (*).

Ce phénomène est général : les observations faites en divers points globe ont conduit à des résultats semblables. Cependant il est impossi de conclure, des données obtenues jusqu'ici, la loi de ces variations. Il impossible de savoir, par exemple, si elles sont périodiques ; si elles os lent entre des limites déterminées ; etc.

3° *Variations accidentelles* ou *orages magnétiques*. — On donne le n de variations accidentelles ou d'orages magnétiques à de véritables p turbations, qui surviennent brusquement dans les mouvements de l guille aimantée, sans qu'il soit possible d'en prévoir ni l'époque, n grandeur. Arago a cru remarquer qu'elles coïncident généralement a l'apparition d'aurores boréales, soit en des points voisins, soit en points éloignés. — Des observations suivies, faites dans les observato qui dépendent des colonies anglaises et qui couvrent la surface du gl ont déjà montré que ces orages ne sont pas locaux, mais qu'ils appar sent simultanément, avec des intensités diverses, en un grand nom de points : la cause qui les produit ne réside donc pas dans des phé mènes qui s'accompliraient dans notre atmosphère, à une petite dista de la surface du globe.

L'*inclinaison* éprouve des variations semblables à celles de la décli son; mais l'amplitude en est moins considérable. D'ailleurs, elles s plus difficiles à évaluer avec précision. — Toutefois, l'observation mo que, pour un même jour, l'inclinaison est maximum dans la matin minimum dans l'après-midi, et que l'amplitude de la variation diu est, pour nos contrées, d'environ 4′ à 5′. — Dans une même année, l clinaison est maximum en été, minimum en hiver, et l'amplitude d variation annuelle est d'environ 15′.

900. **Lignes construites pour représenter les déclinais ou les inclinaisons magnétiques, à la surface du globe.** Malgré les variations qu'éprouvent la déclinaison et l'inclinaison dan cours d'une année, on peut considérer la moyenne des obs-rvati faites, en un point déterminé de la terre, pendant une année, com représentant la déclinaison ou l'inclinaison de ce point pendant c année. On a cherché à représenter les résultats ainsi obtenus, pour div points du globe, par des courbes tracées à la surface de la sphère. Deux systèmes ont été successivement employés.

Dans l'un de ces systèmes, le plus ancien, on a réuni par des lig continues les points d'*égale déclinaison*, ou les points d'*égale inclinai* c'est-à-dire les points pour lesquels l'une ou l'autre boussole fourni même indication. Ces lignes sont très-irrégulières : ce ne sont ni

(*) Depuis 1864, les tuyaux de conduite du gaz d'éclairage, placés aux environ l'Observatoire de Paris, empêchent de compter sur l'exactitude absolue des ob vations magnétiques. (*Annuaire du bureau des longitudes.*)

grands cercles de la sphère, ni des parallèles, ni des lignes tracées sur le globe d'après aucune loi simple. — On a nommé, dans ce système, *pôles magnétiques* les points où l'aiguille d'inclinaison se place verticalement, c'est-à-dire où l'inclinaison est égale à 90 degrés. En ces points, la déclinaison est indéterminée, puisque, les forces du couple terrestre étant verticales, elles ne peuvent communiquer aucun mouvement à une aiguille mobile dans un plan horizontal. Les pôles magnétiques ne coïncident pas avec les pôles géographiques de la terre; ils ne sont même pas situés aux extrémités d'un même diamètre du globe; l'un est à 15 degrés du pôle nord, l'autre à 18 degrés du pôle sud. — Enfin on a nommé *équateur magnétique* ou *ligne sans inclinaison* la ligne formée par les points où l'aiguille d'inclinaison est horizontale; c'est une courbe irrégulière, qui coupe l'équateur géographique en deux points situés à peu près aux extrémités d'un même diamètre.

A ces lignes, Duperrey en a substitué d'autres, qu'il a désignées sous les noms de *méridiens magnétiques* et de *parallèles magnétiques*. — Pour construire un méridien, on marque sur la sphère, en une première station m, la direction de l'aiguille de déclinaison en ce point; sur cette direction, on prend une seconde station voisine m', et l'on marque encore la direction de l'aiguille de déclinaison; sur cette direction, on prend une nouvelle station m'' où l'on opère de même, et ainsi de suite. Si les points m, m', m'', etc., sont suffisamment rapprochés, on obtient ainsi un contour polygonal dont la limite est une courbe qu'on nomme un *méridien magnétique*. — On nomme *parallèles magnétiques* les courbes tracées de manière qu'elles soient partout normales aux méridiens qu'elles rencontrent. — Or, on trouve que les méridiens magnétiques, pris dans une étendue un peu considérable, s'écartent peu de grands cercles de la sphère : les plus grands écarts se montrent au voisinage des pôles, c'est-à-dire aux points où, les composantes horizontales des forces du couple terrestres étant très-petites, la détermination de la déclinaison présente par là même, beaucoup d'incertitude. De même, les parallèles magnétiques diffèrent peu de petits cercles de la sphère. — Ce dernier système de lignes offre donc des formes moins compliquées que le précédent.

VI. — MÉTÉORES LUMINEUX

* 901. **Arc-en-ciel.** — Lorsque le soleil est peu élevé au-dessus de l'horizon, et qu'en face de lui se trouve un nuage se résolvant en pluie, un spectateur, placé de manière à tourner le dos au soleil et à regarder le nuage, voit se produire le phénomène de l'*arc-en-ciel*. Une bande circulaire, colorée des couleurs du spectre, se développe devant lui; le violet occupe le bord interne de cette bande; le rouge, le bord externe. Quelquefois, un deuxième arc-en-ciel enveloppe le premier; les couleurs, moins brillantes, y sont disposées dans un ordre inverse.

prolongées se rencontrent en un point H de la droite OA, laquelle est bissectrice de l'angle RHR′; enfin, que l'angle d'incidence RIN est égal à l'angle d'émergence R′I′N′. — Pour le cas d'une réflexion intérieure, on trouve :

	RAYONS ROUGES.	RAYONS VIOLETS.
Valeur de l'angle ω.	42° 1′ 10″. . . .	40° 17′
Angle d'incidence	59° 23′ 30″. . . .	58°

Soit donc SAS′ (*fig.* 674) une droite passant par le centre du soleil et par l'œil du spectateur que nous supposerons placé au point A; menons par ce dernier point, vers le nuage, une droite quelconque AM faisant avec AS′ un angle de 42° 1′ 10″ : pendant la chute de la pluie, cette droite

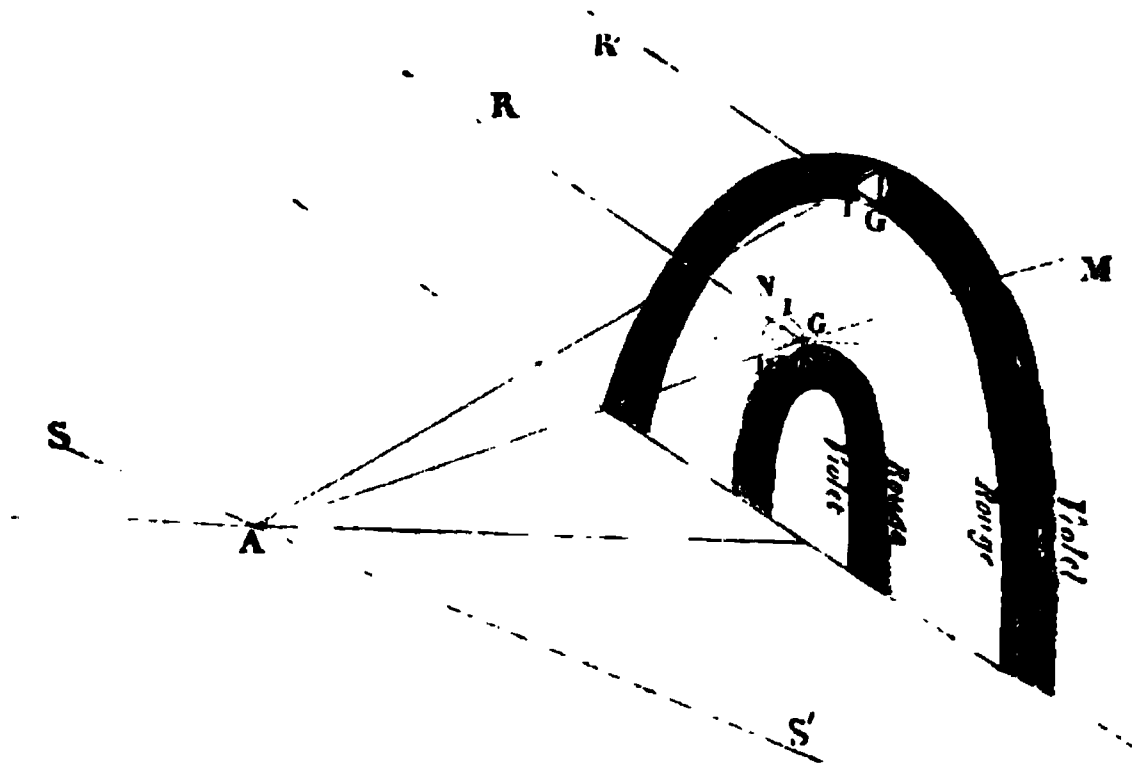


Fig. 674.

est à chaque instant rencontrée par des gouttes d'eau, de telle façon que l'angle d'incidence soit égal à 59° 23′ 30″. Soit G une de ces gouttes; menons par son centre une parallèle à la bissectrice de l'angle MAS′ et considérons le rayon solaire dont la direction RI est symétrique de I′A *par* rapport à cette parallèle. Ce rayon, en se réfractant au point I, subit une décomposition, et l'on voit, d'après ce qui précède, que le rayon rouge auquel il donne naissance sortira de la goutte d'eau suivant I′A, après s'être réfléchi une fois dans son intérieur; on voit, de plus, que les rayons très-voisins de RI donneront, à l'émergence, un faisceau de rayons efficaces; l'œil de l'observateur placé en A recevra donc de la lumière rouge dans la direction I′A. — Les mêmes conclusions s'appliquant à *toute* droite qui fait avec AS′ un angle de 42° 1′ 10″, le spectateur verra un arc rouge suivant l'intersection de la voûte céleste avec la surface d'*un* cône engendré par la révolution de l'A autour de AS′. Cet arc rouge ne sera d'ailleurs pas une simple *ligne* lumineuse, mais bien une *bande* ayant une largeur angulaire égale au diamètre apparent du soleil; on le

* **Cercles parhéliques. — Parhélies.** — Un *cercle parhélique* est une bande blanche horizontale PP′ (*fig.* 675 et 676), passant par le soleil S, et ayant une hauteur égale au diamètre de l'astre. Il accompagne fréquemment le halo, qu'il coupe en deux points *s* et *s′* (*fig.* 675); en ces points, on voit apparaître des images du soleil, très-vives et colorées, qu'on nomme *parhélies*. Ordinairement on observe aussi une image blanche de l'astre, au point du cercle parhélique qui est diamétralement opposé au soleil; on lui donne le nom d'*anthélie* ou celui de *faux-soleil*. — Lorsque l'arc AA′ enveloppe le halo de 25° (*fig.* 676), les parhélies *s* et *s′* apparaissent aux intersections de cet arc AA′ avec le cercle parhélique.

Le cercle parhélique est dû à la réflexion de la lumière du soleil sur les faces des prismes de glace qui se sont placées verticalement sous l'influence de la pesanteur.

* 303. **Couronnes.** — Les *couronnes* sont encore des cercles colorés, qui apparaissent autour du soleil ou autour de la lune. Elles se distinguent des halos par une disposition inverse des couleurs : le rouge est toujours à l'extérieur, le violet à l'intérieur ; leur diamètre est d'ailleurs moindre que celui des halos. — On observe fréquemment plusieurs couronnes concentriques : l'angle sous lequel on voit le rayon de la couronne intérieure varie depuis 1° 30′ jusqu'à 4°.

Le phénomène des couronnes peut être reproduit artificiellement d'une manière assez frappante, en saupoudrant de lycopode une lame de verre, à travers laquelle on regarde la flamme d'une bougie placée à une certaine distance. — Pour se rendre compte de ce phénomène, il suffit de considérer l'action exercée sur les rayons solaires par des nuages formés de gouttelettes sphériques et sensiblement égales entre elles.

PROBLÈMES

PROBLÈMES SUR LA PESANTEUR ET L'HYDROSTATIQUE

I. *On a laissé tomber une pierre au fonds d'un puits, et l'on a entendu le bruit de sa chute 4",5, après son départ. Quelle est la profondeur du puits? — On supposera que le son se propage d'un mouvement uniforme, avec une vitesse de 340 mètres par seconde.*

Solution. — Représentons par T le temps écoulé entre le départ de la pierre et le moment où le bruit de sa chute est parvenu à l'oreille : soit t la durée de la chute et x la profondeur inconnue du puits. En désignant par g l'intensité de la pesanteur, on aura :

(1) $$x = \frac{1}{2} g t^2.$$

D'autre part, le bruit de la chute a mis à parvenir à l'oreille un temps $T - t$; donc si v est la vitesse de propagation du son, on a

$$x = v(T - t); \text{ d'où } = -\frac{x}{v};$$

en substituant cette valeur de t dans l'équation (1) on arrive à l'équation du second degré

$$x^2 - 2x\left(vT + \frac{v^2}{g}\right) + v^2T^2 = 0.$$

d'où l'on tirera :

$$x = vT + \frac{v^2}{g} \pm \sqrt{\left(2vT + \frac{v^2}{g}\right)\frac{v^2}{g}}.$$

Or, remarquons que la hauteur x du puits doit être inférieure à vT, puisque ce produit exprimerait l'espace parcouru par le son dans le temps T : donc la valeur correspond au signe négatif du radical est la seule qui convienne au problème tuel. En remplaçant les lettres par leurs valeurs numériques, on trouve :

$$x = 88^m,2.$$

II. *Un corps étant placé dans l'un des plateaux d'une balance, on constate qu'il faut, pour lui faire équilibre, placer dans l'autre plateau un poids de 3 kilogrammes. Le même corps étant placé dans l'autre plateau, on trouve qu'il faut, pour faire équilibre, placer dans le premier plateau un poids de 3 600 grammes. On demande quel est le poids du corps, et quel est le rapport qui existe entre les longueurs des deux bras de la balance.*

Solution. — Soit x le poids du corps en kilogrammes, a la longueur du bras à l'extrémité duquel il a été placé dans le premier équilibre, b la longueur de l'autre bras ; on aura, en considérant successivement les deux équilibres :

(1) $$\frac{x}{3} = \frac{b}{a},$$

(2) $$\frac{x}{3,6} = \frac{a}{b}$$

En multipliant ces équations membre à membre, il vient

$$\frac{x^2}{3 \times 3{,}6} = 1 ; \text{ d'où } x = \sqrt{3 \times 3{,}6} = 3^{m},286.$$

En divisant membre à membre l'équation (2) par l'équation (1), on trouve

$$\frac{a^2}{b^2} = \frac{3}{3{,}6} ; \quad \text{d'où } \frac{a}{b} = 0{,}913.$$

III. *Le petit piston d'une presse hydraulique a une section de 15 centimètres carrés et la pression qu'on exerce sur lui est égale à 40 kilogrammes. — On demande 1° quelle pression exercera le gros piston, quand il cessera de pouvoir s'élever, en supposant que sa section soit de 3 décimètres carrés ; 2° quelle section on devrait donner au gros piston pour qu'il pût exercer une pression de 2000 kilogrammes.*

Solution. — 1° La pression exercée par le petit piston sur chaque centimètre carré est $\frac{40^{kil}}{15}$; donc la pression transmise à la surface inférieure du gros piston sera $\frac{40^{kil}}{15} \times 300 = 800$ kilogrammes ; ce sera aussi la pression que ce piston pourra exercer sur le corps soumis à son action.

2° Pour que le gros piston pût exercer une pression de 2000 kilogrammes, il faudrait que sa section contînt autant de centimètres carrés que 2000 kilogrammes contiennent de fois $\frac{40^{kil}}{15}$, c'est-à-dire que sa section fût égale à $2000 : \frac{40}{15} = 750$ centimètres carrés.

IV. *On a un tonneau auquel on a adapté, comme le représente la figure 60, un long tube dont la hauteur est de 4 mètres et le rayon de 5 millimètres. Ce tonneau est formé de deux cônes tronqués, réunis par leur grande base : le rayon de la grande base est de 30 centimètres ; le rayon de l'autre est de 25 centimètres. La hauteur totale du tonneau est de 50 centimètres. L'appareil est rempli d'eau jusqu'à l'extrémité du tube. — Calculer : 1° la pression supportée par la base inférieure du tonneau ; 2° la pression supportée par sa base supérieure ; 3° le poids de l'eau contenue dans l'appareil.*

Solution. — Nous nous contenterons d'indiquer les résultats, qui sont faciles à obtenir d'après les principes connus (76 à 79). — 1° La pression supportée par la base inférieure est $747^{kil},864$; 2° la pression supportée par la base supérieure est $664^{kil},416$; 3° le poids total de l'eau contenue dans l'appareil est $110^{kil},958$.

V. *Un seau de bois, du poids de 6 kilogrammes, et d'une capacité de 20 litres, est rempli d'une pâte liquide, formée de kaolin (terre à porcelaine) et d'eau. Il pèse alors $36^{kil},4$. — On demande le poids du kaolin et celui de l'eau, sachant que la densité du kaolin sec est 2,3.*

Solution. — Si le seau était rempli uniquement de kaolin sec, comme sa capacité est de 20 litres, son poids serait :

$$6^{kil} + 2^{kil},3 \times 20, \quad \text{c'est-à-dire } 52^{kil}.$$

Si l'on enlevait 1 litre de kaolin, pour le remplacer par 1 litre d'eau, ce poids de 52 kilogrammes subirait une diminution de $2^{kil},3 - 1^{kil}$, ou de $1^{kil},3$. Or l'excès de 52 kilogrammes sur $36^{kil},4$ est $15^{kil},5$; donc autant de fois ce nombre contiendra $1^{kil},3$, autant il y aura de litres d'eau dans la pâte. — Le quotient de 15,6 par 1,3 est 2 ; le seau contient donc 12 litres ou 12 kilogrammes d'eau ; le volume du kaolin étant de 20 — 12 ou de 8 litres, le poids de cette matière est $2^{kil},3 \times 8$, c'est-à-dire $18^{kil},4$.

On peut vérifier d'ailleurs que le poids du seau, savoir 6 kilogrammes, augmenté de celui de l'eau, savoir 12 kilogrammes, et de celui du kaolin, savoir $18^{kil},4$, reproduirait le poids total de $36^{kil},4$.

VI. *On a un cylindre d'acier, de 22 centimètres de longueur, qu'on voudrait lester avec un cylindre de platine de même diamètre, de manière qu'il se tînt verticalement flottant dans du mercure, la partie non plongée du cylindre d'acier n'étant que de*

2 centimètres. Quelle longueur faut-il donner au cylindre de platine? (Baccalauréat, Paris 1868.)

Désignons par d la densité du platine, par d' celle de l'acier, et par d'' celle du mercure; appelons x la longueur du cylindre de platine. Exprimons que le poids du corps plongé et le poids du mercure déplacé sont égaux entre eux; nous aurons

$$dx + 22d' = (20+x)\,d'';$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{20d'' - 22d'}{d - d''};$$

et il suffira de remplacer d, d' et d'' par leurs valeurs, pour avoir la valeur numérique de x.

VII. *Quel est le rapport des poids x et y de deux cylindres de fer et de platine qu'il faudrait fixer l'un à l'autre, pour que le système pût se maintenir en équilibre au milieu du mercure? — Densité du fer*, 7,8; *densité du platine*, 21; *densité du mercure*, 13,6.

Solution. — Les poids des cylindres étant x et y, leurs volumes seront respectivement $\frac{x}{7,8}$ et $\frac{y}{21}$. Le volume du mercure déplacé sera égal à la somme de ces volumes et le poids du mercure déplacé sera $\left(\frac{x}{7,8} + \frac{y}{21}\right) 13,6$. Ce poids devant être égal à la somme des poids des deux cylindres, on aura :

$$\left(\frac{x}{7,8} + \frac{y}{21}\right) 13,6 = x + y;$$

d'où

$$x\left(\frac{13,6}{7,8} - 1\right) = y\left(1 - \frac{13,6}{21}\right),$$

ce qui donne définitivement

$$\frac{x}{y} = 0,474.$$

VIII. *Un morceau de platine et une boule de cire se font équilibre dans les plateaux d'une balance parfaitement juste. Calculer le rapport des poids de ces deux corps, en tenant compte de la poussée qu'ils éprouvent de la part de l'air. — Poids spécifique du platine*, 21; *poids spécifique de la cire*, 0,96; *poids spécifique de l'air*, 0,0013.

Solution. — Soit p le poids du platine; son volume, exprimé en unités correspondantes, est $\frac{p}{21}$, et par suite le poids de l'air qu'il déplace est $\frac{p}{21} \times 0,0013$. De même, p' étant le poids de la cire, le poids de l'air qu'elle déplace est $\frac{p'}{0,96} \times 0,0013$. Or, les poids apparents de ces deux corps dans l'air étant égaux, on a

$$p - \frac{p}{21} \times 0,0013 = p' - \frac{p'}{0,96} \times 0,0013;$$

d'où l'on déduira facilement

$$\frac{p}{p'} = \frac{21\,(0,96 - 0,0013)}{0,96\,(21 - 0,0013)} = \frac{20,132700}{20,158752} = 0,9987.$$

IX. *Une sphère de platine et un cylindre de cuivre ayant même diamètre sont suspendus aux deux extrémités du fléau d'une balance parfaitement juste, et plongent, la première dans du mercure, le second dans l'eau. Quelle doit être la hauteur du cylindre pour que le fléau se tienne horizontal? — Poids spécifique du platine*, 22; *poids spécifique du cuivre*, 8,8; *poids spécifique du mercure*, 13,6.

Solution. — Soit d le diamètre commun de la sphère et du cylindre, h la hauteur

inconnue du cylindre; on verra facilement que le poids apparent de la sphère de platine dans le mercure est $\frac{1}{6}\pi d^3 h$ (22 — 13,6); le poids apparent du cylindre de cuivre dans l'eau est $\frac{1}{4}\pi d^2$ (8,8 — 1). — En égalant ces deux expressions, supprimant le facteur commun $\frac{1}{2}\pi d^2$, et effectuant les calculs, on arrive à l'équation

$$h \times 3{,}9 = d \times 2{,}8\,; \quad \text{d'où } h = d \times 0{,}718.$$

L'équilibre aura donc lieu, pour une valeur quelconque du diamètre commun de la sphère et du cylindre, pourvu que la hauteur du cylindre soit égale aux 0,718 environ de ce diamètre.

X. *Un cylindre de bois de sapin, de 2 centimètres carrés de base sur 30 centimètres de hauteur, flotte sur l'eau, ses arêtes étant verticales. On demande :*

1° *Quelle est la longueur de la partie immergée;*

2° *Quel devrait être le diamètre d'une sphère de plomb qu'on suspendrait au-dessous du cylindre, et qui le ferait plonger de 25 centimètres.*

On sait que la densité du bois de sapin est 0,66, *et celle du plomb* 11,35.

Solution. — 1° Le poids du cylindre de sapin, exprimé en grammes, est de $2 \times 30 \times 0{,}66$ ou de $39^{gr},6$: d'après le principe des corps flottants (90), ce nombre exprime aussi le poids de l'eau déplacée. Mais, si l'on connaissait la longueur de la portion immergée, le poids de l'eau déplacée pourrait s'obtenir aussi en multipliant cette longueur par la base du cylindre, c'est-à-dire par 2; si donc on divise 39,6 par 2, le quotient 19,8 sera en centimètres la longueur cherchée.

2° Pour trouver le diamètre d de la sphère de plomb qui ferait plonger le cylindre de 25 centimètres, nous exprimerons, d'après le même principe, que le poids du cylindre augmenté de celui de la sphère est égal au poids de l'eau déplacée par la portion immergée, plus le poids de l'eau déplacée par la sphère. Nous aurons ainsi l'équation :

$$39{,}6 + \frac{1}{6}\pi d^3 \times 11{,}35 = 2 \times 25 + \frac{1}{6}\pi d^3.$$

En simplifiant cette équation, et tirant la valeur de d, qui est calculable par logarithmes, on trouve :

$$d = 1^c,21.$$

Ainsi, le cylindre non lesté s'enfonce dans l'eau de $19^c,8$, et le diamètre de la sphère de plomb qui le ferait plonger de 25 centimètres est de $1^c,25$.

XI. *Un morceau de fer plongé dans un vase plein d'eau en a fait sortir* 10 *grammes. Mis dans un vase plein de mercure, il y flotte en y déplaçant* 78 *grammes de ce dernier liquide. On demande le poids, le volume et la densité du morceau de fer.* (Baccalauréat, Paris, 1867.)

On trouvera facilement que le volume est 10 centimètres cubes; le poids est $106^{gr},02$; la densité est 10,6.

XII. *Un aréomètre de Baumé, destiné aux liquides plus lourds que l'eau, marque* 66 *degrés dans l'acide sulfurique concentré. — Quelle est la densité de cet acide, sachant que la densité de la solution saline qui a servi à marquer le* 15° *degré de l'instrument est* 1,1136 ?

Solution. — Soit l'aréomètre représenté par la figure 92; nommons V le volume de liquide, exprimé en centimètres cubes, qu'il déplace quand il affleure au zéro, et v le volume de liquide que déplace une division de l'instrument. — Quand l'aréomètre flotte sur l'eau, il affleure au zéro; le volume de l'eau déplacée est donc de V centimètres cubes, et le poids de cette eau est de V grammes; ce nombre exprime aussi le poids du corps flottant (90). Quand l'aréomètre flotte sur l'acide sulfurique, il affleure au 66° degré; le volume de l'acide déplacé est donc de $V - 66v$, et le poids de cet acide exprimé en grammes, est de $(V - 66v)x$, x désignant la densité cherchée; ce

telle sorte que sa surface ne soit plus qu'à 10 centimètres au-dessous du niveau dans la cuvette. On demande d'en déduire la capacité du récipient, en supposant que la température soit restée invariable pendant l'expérience.

Solution. — Soit x le volume du récipient, exprimé en centimètres cubes. Avant l'ouverture du robinet, le volume de l'air contenu dans l'appareil est x, sa pression est 770 millimètres ; quand le robinet est ouvert, le volume de cet air devient $x + 2(90 - 10)$, ou $x + 160$, et sa pression est $760 - 100$ millimètres, ou 660 millimètres. D'après la loi de Mariotte, le produit de chacun de ces volumes par la pression correspondante étant constant (141), on a :

$$x \times 770 = (x + 160)\, 660 ;$$

d'où l'on tire

$$x = 960^{cc}.$$

XVI. *On a construit un baromètre à cuvette sans se préoccuper d'en chasser complétement l'air, de sorte que la chambre barométrique contient une quantité inconnue de ce gaz. — On fait une première observation, dans laquelle on mesure successivement la hauteur de la colonne de mercure qui est 748 millimètres, et la longueur de la chambre barométrique qui est 122 millimètres. On soulève alors un peu le tube, et l'on constate que la hauteur du liquide devient 750 millimètres, la chambre barométrique acquérant une longueur de 141 millimètres. Quelle est la pression atmosphérique au moment de l'expérience, en supposant que le tube soit bien cylindrique, au moins dans sa partie supérieure* (*) ?

Solution. — Soit x la pression atmosphérique inconnue. Dans la première observation, le volume de l'air, représenté par la longueur de tube qu'il occupe, est 122, sa force élastique est $x - 748$; dans la seconde observation, le volume de cet air est 141, sa force élastique est $x - 742$. On a donc (141) :

$$(x - 748)\, 122 = (x - 750)\, 141 ;$$

d'où l'on tirera

$$x = 762^{mm},8.$$

XVII. *Un cylindre ayant une capacité de 3 litres, et contenant de l'air, est muni de deux tubes horizontaux* A *et* B, *adaptés au voisinage de sa partie supérieure et garnis de robinets. Le premier tube* A *communique avec un long tube vertical descendant, dont l'extrémité ouverte plonge dans une cuvette à mercure : le robinet de* A *étant seul ouvert, on constate que le liquide s'élève dans ce tube vertical à 250 millimètres au-dessus de son niveau extérieur. Le tube* B *communique de même avec un petit tube vertical qui est plongé tout entier dans une solution saline, ayant pour densité* 1,15 *et contenue dans un vase ouvert. Après avoir fermé le robinet de* A, *on ouvre celui de* B : *quel est le poids de la solution saline qui entrera dans le cylindre ? La baromètre marque 752 millimètres au moment de l'expérience.*

Solution. — Avant l'ouverture du robinet du tube B, le volume de l'air contenu dans le cylindre est 3 litres, et sa force élastique est $752 - 250$, ou 502 millimètres. Quand on ouvre le robinet de B, la solution saline entre dans le cylindre, et comprime l'air jusqu'à ce que sa force élastique devienne égale à la pression extérieure qui est de 732 millimètres ; si donc on désigne par v le volume auquel est réduit l'air, exprimé en centimètres cubes, on doit avoir (141)

$$v = \frac{3000 \times 502}{752} = 2002^{cc},66.$$

Le volume de liquide qui entre dans le cylindre est donc $3000 - 2002,66 = 997^{cc},34$; par suite, son poids exprimé en grammes est $997,34 \times 1,15 = 1147^{gr},941$.

(*) Cette méthode est applicable à la construction de baromètres dont on pourrait enlever le liquide, en voyage, pour éviter les chances de rupture, et qu'on remplirait seulement au moment de l'observation, sans se préoccuper d'en expulser complétement l'air : le tube pourrait en outre être complétement métallique, en fer par exemple, sauf la partie supérieure qui serait formée par un tube de verre assez court et bien cylindrique. ARAGO *Astronomie populaire.*)

XVIII. *Un gros tube cylindrique vertical* M, *ouvert à sa partie supérieure, et u petit tube cylindrique vertical* m, *fermé à sa partie supérieure, communiquent ent eux, par leurs parties inférieures, au moyen d'un tube de jonction ; le premier* M *une section de* 50 *centimètres carrés ; le second* m, *une section quelconque. On a ver du mercure dans l'appareil, et l'on a enfermé ainsi dans le tube* m *un certa volume d'air, qui y occupe une longueur de* 2m.15, *les niveaux du liquide dans l deux branches étant dans le même plan horizontal. Quelle pression, en kilogramm devrait-on exercer sur le liquide du tube* M, *à l'aide d'un piston qui s'adaptera exactement dans ce tube, pour que l'air n'occupât plus, dans le tube* m, *qu'une lo gueur de* 0m,52 ? — *Le tube* m *est supposé assez étroit par rapport à* M *pour que niveau du mercure n'ait pas sensiblement baissé dans* M ; *la température re invariable pendant l'expérience, et la pression barométrique est de* 760 *millimètr*

Solution. — Menons un plan horizontal par la face inférieure du piston, quand l'a du tube *m* est réduit au volume indiqué dans l'énoncé : deux surfaces égales pris dans ce plan, et situées l'une dans le cylindre M, l'autre dans le tube *m*, doivent su porter des pressions égales. Or une surface de 1 centimètre carré, prise à ce nive dans le tube, supporte 1° la pression due au poids du mercure dont la hauteur e 2m,15 — 0m,52 ou 163c ; 2° la pression exercée par l'air comprimé, qui équivaut au poi d'une colonne de mercure ayant pour hauteur $76^c \times \frac{215}{52}$; cette surface suppo donc une pression totale exprimée par le poids d'une colonne de mercure ayant po base 1 centimètre carré, et pour hauteur

$$163 + 76 \times \frac{215}{52} \quad \text{ou} \quad \frac{24816^c}{52}.$$

La valeur de cette pression, exprimée en grammes, est donc

$$\frac{24816 \times 13,6}{52} \quad \text{ou} \quad \frac{337497^{gr},6}{52}.$$

Donc enfin, le piston du tube M, qui a une surface de 50 centimètres carrés, supporte une pression de

$$\frac{337497^{gr},6 \times 50}{52},$$

ou approximativement, de $324^{kil},5$.

XIX. *Un corps de pompe cylindrique, auquel on veut donner une hauteur* 90 *centimètres, est terminé inférieurement par un tuyau d'aspiration cylindriq dont le diamètre intérieur est* 35 *millimètres, et dont la hauteur est* 4m,80 *au-dess du niveau de l'eau dans laquelle il plonge ; quel diamètre devra-t-on donner à corps de pompe pour que l'eau s'élève, au premier coup de piston, jusqu'au somm du tuyau d'aspiration ? On supposera la pression atmosphérique égale à* 10 *mèt d'eau.*

Solution. — Soit x le diamètre du corps de pompe ; supposons qu'il satisfasse à condition exprimée dans l'énoncé ; l'air qui, avant le premier coup de piston, occup le volume du tuyau d'aspiration et avait une force élastique représentée par une colon d'eau de 10 mètres, occupera, quand le piston sera en haut de sa course, le volu du corps de pompe, et aura une force élastique représentée par une colonne d'eau $10^m - 4^m,8$. Si l'on exprime que le produit de chacun de ces volumes de l'air par pression correspondante est constant (141), on a

$$(10 - 4,8)\frac{\pi x^2}{4} \times 90 = 10\,\frac{\pi\,(3,5)^2}{4} \times 480\,;$$

d'où l'on tire, en supprimant les facteurs communs, et effectuant les calculs

$$x = \sqrt{\frac{(3,5)^2 \times 480 \times 10}{(10 - 4,8) \times 90}} = 11^c,2.$$

XX. *Une fontaine de compression (fig. 159), de forme cylindrique, ayant une base de 5 décimètres carrés et une hauteur de 50 centimètres, contient de l'eau jusqu'à la moitié de sa hauteur : on y adapte, pour y comprimer de l'air, une pompe à main, dont le corps de pompe a une section de 12 centimètres carrés et une hauteur de 40 centimètres. On a donné 20 coups de piston : trouver, 1° à quelle hauteur l'eau s'élèverait dans un tube étroit, ouvert à sa partie supérieure, qu'on substituerait à la pompe ; 2° quelle pression, en kilogrammes, on devrait exercer sur une soupape placée à la partie supérieure du cylindre et ayant une surface de 15 centimètres carrés, pour la maintenir fermée.*

Solution. — 1° Le volume de la partie du cylindre qui est comprise au-dessus de l'eau et occupée par l'air est, en centimètres cubes, 500×25 ou 12500. Le volume du corps de pompe de la pompe à main est, en centimètres cubes, 12×40, et puisqu'on a donné 20 coups de piston, on a introduit dans le cylindre une quantité d'air qui occuperait, sous la pression atmosphérique, un volume de $12 \times 40 \times 20$ ou 9600 centimètres cubes. Cet air acquiert, dans le cylindre, une force élastique représentée par une hauteur H de mercure qui est

$$H = 760 \times \frac{9600}{12500} = \frac{72960}{125}.$$

Cette force élastique s'ajoute, dans le cylindre, à la pression de l'air qui s'y trouvait d'abord (148), pression qui est égale à la pression atmosphérique ; mais, quand on ouvre le robinet pour laisser l'eau s'élever dans le tube adapté à l'appareil, la pression atmosphérique s'exerce aussi sur la surface du liquide dans ce tube : on peut donc considérer la colonne d'eau comme faisant simplement équilibre à la force élastique de l'air introduit dans le cylindre par la pompe à main. De là résulte que la hauteur de cette colonne sera

$$\frac{72960}{125} \times 13{,}6 = 7938^{mm} \text{ ou } 7^{m},938.$$

2° Sur une soupape ayant une surface de 15 centimètres carrés, l'excès de la pression intérieure sur la pression extérieure est exprimé, en kilogrammes, par

$$79{,}38 \times 0{,}15 = 11^{kil},907.$$

Telle sera aussi la pression qu'on devra exercer sur la soupape, pour la maintenir fermée.

XXI. *Sous le récipient d'une machine pneumatique contenant de l'air sec à 0° et à la pression de 760 millimètres, on place un fléau de balance dont les bras sont égaux, et aux deux extrémités duquel sont suspendus deux cubes : l'un a 3 centimètres de côté et pèse dans l'air $26^{gr},3240$, et l'autre qui a 5 centimètres de côté, pèse dans l'air $26^{gr},2597$; par suite de cette inégalité de poids, le fléau n'est pas horizontal. On fait le vide dans l'appareil, et on demande quelle sera la pression de l'air sous le récipient quand l'horizontalité sera établie. — La température sera supposée égale à zéro degré pendant toute l'expérience.*

Solution. — Soit x la pression cherchée. Pour obtenir le poids apparent du premier cube, au moment où l'horizontalité sera établie, il suffira de déterminer d'abord son poids dans le vide, et d'en retrancher le poids de l'air qu'il déplace sous le récipient ; or, le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau, à 0° et sous la pression de 760 millimètres, est 0,0013 ; le poids du premier cube dans le vide est donc $26^{gr},3240 + 3^3 \times 0{,}0013$; le poids de l'air qu'il déplace sous le récipient, à la fin de l'expérience, est $3^3 \times \frac{0{,}0013 \times x}{760}$: son poids apparent sous le récipient est donc définitivement

$$26^{gr},3240 + 3^3 \times 0{,}0013 \left(1 - \frac{x}{607}\right).$$

Solution.—Le volume à 0° du fil de cuivre est, en millimètres cubes, $\frac{150000000}{88}$; par suite, le volume à 30° est

$$\frac{150000000}{88} \times \left(1 + \frac{30 \times 3}{58100}\right),$$

ou bien

$$\frac{150000000 \times 5819}{88 \times 5810}.$$

D'autre part, la section à 30° ayant pour valeur $\frac{4 \times 2907}{2905}$, si l'on désigne par x la longueur en millimètres du fil à 30°, on aura pour déterminer x l'équation

$$\frac{4 \times 2907 \times x}{2905} = \frac{150000000 \times 5819}{88 \times 5810}.$$

Le calcul, effectué par logarithmes, donne

$$x = 426^{mm},503.$$

XXVII. *Une sphère de platine, pesée dans le mercure, a perdu de son poids 50 grammes à zéro et 49gr,5415 à 60 degrés. On demande de trouver, d'après ces données, le coefficient de dilatation cubique du platine, sachant d'ailleurs que la densité du mercure à zéro est 13,6, et que le coefficient de dilatation absolue de ce liquide est* $\frac{1}{5550}$.

Solution. — Désignons par V le volume de la sphère de platine à zéro, et par x le coefficient de dilatation cubique du métal ; le poids de mercure à zéro que cette sphère déplace étant 50 grammes, on a

$$V \times 13,6 = 50.$$

A 60 degrés, le volume de la sphère est devenu $V(1 + 60x)$; d'autre part, la densité du mercure est devenue

$$\frac{13,16}{1 + 60 \times \frac{1}{5550}}, \text{ ou } \frac{13,6 \times 185}{187};$$

et comme la perte de poids est maintenant de 49gr,5415, il vient

$$V(1 + 60x)\,\frac{13,6 \times 185}{187} = 49,5415.$$

En remplaçant, dans cette équation, $V \times 13,6$ par 50 et tirant la valeur de x, on aura

$$x = \frac{49,5415 \times 187 - 50 \times 185}{50 \times 185 \times 60} = \frac{14,2605}{555000} = 0,00002569,$$

nombre qui est, à deux unités du huitième ordre près, égal au triple du coefficient de dilatation linéaire du platine. (Voy. le tableau de la page 178.)

XXVIII. *Un baromètre a été observé à deux époques différentes, et a donné 770 millimètres, à 25 degrés, et 760 millimètres à 5 degrés. On demande le rapport entre les deux hauteurs corrigées. Le coefficient de dilatation du mercure est* $\frac{1}{5550}$.

La première hauteur corrigée a pour expression

$$\frac{770}{1 + \frac{25}{5550}}.$$

XXXI. *On demande quel est à 0° le volume intérieur d'une ampoule de verre qui à 25° est exactement remplie par 55^{gr} de mercure. Le coefficient de dilatation cubique du verre est* $\frac{1}{38700}$, *celui du mercure* $\frac{1}{5550}$; *le poids spécifique du mercure à 0° est* 13,59. (Baccalauréat, Paris, 1867.)

On trouvera pour volume intérieur de l'ampoule à zéro $5^{cc},915$.

XXXII. *Un thermomètre est plongé, jusqu'au 20° degré de son échelle, dans un liquide chaud; le mercure s'élève dans la tige jusqu'au 130° degré. Cette indication ne donnant pas la température exacte du liquide, puisque la portion de la colonne mercurielle comprise entre les divisions 20 et 130 n'est pas plongée dans le bain, on demande de calculer la correction qu'elle devra subir, en supposant que la température de la portion extérieure de la colonne mercurielle soit égale à celle de l'atmosphère environnante, savoir 15 degrés; on prendra pour coefficient de dilatation apparente du mercure dans le verre, le nombre* $\frac{1}{6480}$.

Solution. — Désignons par x la température réelle du bain, c'est-à-dire celle que marquerait le thermomètre si toute la tige était plongée; x se compose évidemment de 130 degrés plus la dilatation *apparente* qu'éprouvent $130 - 20$ ou 110 divisions de mercure, lorsque leur température s'élève de 15 degrés à x degrés. Donc

$$x = 130 + 110(x - 15)\frac{1}{6480};$$

d'où l'on tire

$$637\,x = 84075,$$

et

$$x = 131,99.$$

La température corrigée est donc de

$$131°,99.$$

XXXIII. *On demande quelle perte de poids éprouvent, par le seul fait de la poussée de l'air, 100 kilogr. de bois, dont le poids spécifique rapporté à l'eau est* $\frac{6}{10}$. *Le litre d'air dans les conditions de l'expérience pèse* $1^{gr},235$. (Baccalauréat, Paris, 1867.)

On trouvera que la perte de poids est $215^{gr};5$.

XXXIV. *On demande quelle différence il y a entre le poids de 10 litres d'air sec à la température de 10° et à la pression de* $0^{m},76$, *et le poids de 10 litres d'air également sec à la température de 15° et à la pression de* $0^{m},75$. *Le litre d'air sec à 0° et à la pression* $0^{m},76$ *pèse* $1^{gr},295$. *Le coefficient de dilatation de l'air est de* 0,00367. (Baccalauréat, Paris, 1867.)

En appliquant les formules données par les questions de ce genre (p. 217), on trouvera pour la différence cherchée $0^{gr},378$.

XXXV. *Trouver quel rapport on doit établir entre la hauteur du mercure et la longueur de la tige, dans le pendule de Graham (fig. 202), pour que la compensation ait lieu.*

Solution. — Représentons par l_0 la longueur à zéro de la tige du pendule augmentée de la hauteur de l'étrier, et par h_0 la hauteur du mercure à zéro qu'il faut introduire dans l'éprouvette pour que la distance du point de suspension au centre de gravité du liquide soit la même à zéro et à une température déterminée t. L'expression de cette distance, ou la *longueur* du pendule à zéro, est évidemment

$$l_0 - \frac{h_0}{2},$$

en négligeant l'épaisseur du fond de l'éprouvette.

Soit γ le coefficient de dilatation linéaire de l'acier, y la hauteur encore incon-

le volume du gaz, à 100 degrés et sous la pression de 750 millimètres devient

$$5^{lit} \times (1 + 0{,}371)\frac{760}{750} = 6^{lit},9464.$$

De là résulte que le volume de gaz qui sort du ballon sera, à 100 degrés, et sous la pression de 750 millimètres

$$6^{lit},9464 - 5^{lit},0138 = 1^{lit},9326.$$

Le poids du gaz sorti sera donc, en grammes,

$$1{,}9326 \times 1{,}295 \times 1{,}527 \times \frac{1}{1 + 0{,}371} \times \frac{750}{760} = 2^{gr},750.$$

XXXVII. *On a renfermé de l'air sec dans un tube horizontal, à l'aide d'un index de mercure. A la température de* 0°, *sous* 75 *centimètres de pression, l'air occupe* 720 *divisions du tube, divisé en parties d'égale capacité. A une température et sous une pression inconnue, ce même air a occupé* 960 *divisions. Le tube ayant été mis dans de la glace fondante sous la dernière pression, l'air n'y occupe plus que* 750 *divisions. On demande la température et la pression.* (Baccalauréat, Poitiers, 1863.)

On trouvera pour valeur de la pression 72 centimètres, et pour température 76°,2.

XXXVIII. *A quelle température l'oxygène, sous la pression de* 20 *centimètres, aurait-il la même densité que l'hydrogène à* 0°, *sous la pression de* 160 *centimètres?* (Baccalauréat, Poitiers, 1867.)

Solution. — Soit t la température demandée, D la densité de l'oxygène, d la densité de l'hydrogène, l'une et l'autre étant considérées à 0° et sous la pression de 760 millimètres. Représentons par D_t la densité de l'oxygène à la température cherchée et sous la pression de 20 centimètres, et par d_h la densité de l'hydrogène à zéro et sous la pression de 160 centimètres. On aura

$$D_t = \frac{20 \cdot D_0}{76\,(1 + \alpha t)},$$

et

$$d_h = \frac{160 \cdot d}{76}.$$

D'après l'énoncé, on doit avoir

$$D_t = d_h.$$

Donc la valeur de t s'obtiendra en résolvant l'équation

$$1 + \alpha t = \frac{20\ D}{160 d} = \frac{D}{8d}$$

dans laquelle $\alpha t = 0{,}00567$, $d = 0{,}0693$ et $D = 1{,}1056$.

Le second membre de l'équation est sensiblement égal à 2. Donc

$$\alpha t = 1,$$

on trouve alors

$$t = 272°.$$

XXXIX. *Quel doit être le rayon d'un ballon sphérique formé d'un taffetas qui pèse* 250 *grammes le mètre carré, pour que, plein d'hydrogène sec à* 20 *degrés et à la pression de* 750 *millimètres, il ait une force ascensionnelle nulle, lorsqu'il se trouve dans l'air sec à la même température et à la même pression? — Poids du*

750^{mm}. Quelle est, à cette température, la densité de la vapeur d'éther par rapport à l'air ? — Le coefficient de dilatation du mercure est $\frac{1}{5550}$; *le coefficient de dilatation cubique du verre est* 0,0000276.

Solution. — La pression barométrique étant ramenée à 0°, ramenons de même à 0° la colonne de mercure qui s'élève dans la cloche, et dont la température est de 80 degrés : la valeur de cette colonne deviendra

$$152^{mm},16 \times \frac{1}{1 + \frac{80}{5550}} = 150^{mm}$$

Donc la force élastique de la vapeur d'éther, évaluée par la hauteur d'une colonne de mercure qui serait à zéro degré, est $750^{mm} - 150^{mm} = 600$ millimètres. — Le volume de cette vapeur qui occupe, à 80 degrés, un nombre de divisions égal à 366,48 est, en centimètres cubes, $366,48\ (1 + 0,0000276 \times 80)$; le poids du même volume d'air, dans les mêmes conditions de température et de pression, est

$$366,48\ (1 + 0,0000276 \times 80) \times 0,0013 \times \frac{600}{760} \times \frac{1}{1 + 0,00367 \times 80}.$$

La densité de la vapeur par rapport à l'air est donc

$$\frac{0,75}{366,48\ (1 + 0,0000276 \times 80) \times 0,0013} \times \frac{760}{600} \times (1 + 0,00367 \times 80) = 2,575.$$

XLII. *Dans 1 mètre cube d'air à 20 degrés, on a trouvé 11^{gr},56 de vapeur d'eau. Quel est le degré d'humidité de cet air ? On sait que, à 20 degrés, le maximum de tension de la vapeur d'eau est 17^{mm},4 ; 1 litre d'air à 0 degré pèse 1^{gr},3 sous 0^{m},76 de pression ; la densité de la vapeur égale les* $\frac{5}{8}$ *de celle de l'air.*

On trouvera que l'état hygrométrique est sensiblement 0,7.

XLIII. *Trouver le poids de la vapeur d'eau contenue dans 1 mètre cube d'air humide dont la température est de 20 degrés et l'état hygrométrique 0,3. — Trouver aussi le poids de cet air humide lui-même, sachant que sa force élastique totale est de 756 millimètres.*

Solution. — 1° Le poids p de la valeur est donnée par la formule générale

$$p = V \times 1^{gr},293 \times 0,622 \times \frac{f}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t},$$

dans laquelle V désigne le volume exprimé en litres et f la tension de la vapeur. Or à 20 degrés, la force élastique maximum est de $17^{mm},39$; et, comme l'état hygrométrique de l'air est 0,3, on a :

$$\frac{f}{17,39} = 0,3 ;$$

d'où

$$f = 17,39 \times 0,3 = 5,217.$$

Si l'on remplace V et f par leurs valeurs, α par 0,00367, et t par 20, la formule devient

$$p = 1000 \times 1^{gr},293 \times 0,622 \times \frac{5,217}{760} \times \frac{1}{1 + 20 \times 0,00367},$$

ou

$$p = \frac{1^{gr},293 \times 622 \times 5,217}{760 \times 1,0734} = 5^{gr},145 ;$$

Solution. — La force élastique maximum de la vapeur d'eau à la température de l'expérience étant $17^{mm},4$ et la fraction de saturation étant 0,472, la force élastique de la vapeur d'eau dans l'air, au moment de l'observation, est $17^{mm},4 \times 0,472$ ou $8^{mm},2128$. Soit d la densité de l'air, par rapport à l'eau, à zéro degré et sous la pression de 760 millimètres ; la densité de l'air contenu dans le mélange et supposé sec est, au moment de l'expérience,

$$d \times \frac{758 - 8,2128}{760} \times \frac{1}{1 + 0,00367 \times 20},$$

et la densité de la vapeur d'eau est

$$0,622\, d \times \frac{8,2128}{760} \times \frac{1}{1 + 0,00367 \times 20};$$

d'autre part, la densité de l'air sec à la pression de 758 millimètres et à la température x serait

$$d \times \frac{758}{760} \times \frac{1}{1 + 0,00367 \times x}.$$

En égalant cette expression à la somme des deux précédentes, et supprimant les facteurs communs, il vient

$$\frac{758 - 8,2128\,(1 - 0,622)}{1 + 0,00367 \times 20} = \frac{758}{1 + 0,00367\, x};$$

d'où l'on tire

$$x = 21°,20.$$

XLVI. — *A la température de 20 degrés et sous la pression de 760 millimètres, on a introduit dans un récipient de l'air sec et du gaz hydrogène saturé d'humidité. On a fait passer ensuite une portion de ce mélange dans l'eudiomètre à eau, où elle s'est saturée de vapeur ; l'analyse a montré que cette portion renfermait des volumes égaux d'air et d'hydrogène. Trouver, d'après ce résultat, quelle était la force élastique de la vapeur dans le récipient. — On supposera que l'analyse eudiométrique ait été faite sous la pression barométrique de 760 millimètres et à la température de 20 degrés ; on prendra d'ailleurs $17^{mm},4$ pour la tension maximum de la vapeur à cette température.*

Solution. — Désignons par V le volume qu'occuperait, sous la pression de 760 millimètres, l'air sec contenu dans le récipient, et par V' le volume qu'occuperait l'hydrogène saturé, sous la même pression ; V + V' représentera la capacité du récipient. Soit f la tension de la vapeur renfermée dans cette capacité ; si, du volume V + V' sous lequel sa tension est f, on réduisait la vapeur au volume V', elle atteindrait son point de saturation ; sa tension serait alors $17^{mm},4$. Or on a, d'après la loi de Mariotte :

$$(1) \qquad \frac{f}{17^{mm},4} = \frac{V'}{V + V'};$$

cherchons donc, d'après les données de l'analyse, à déterminer $\frac{V'}{V + V'}$; il sera facile d'en déduire f.

Soit 1 le volume du mélange saturé dans l'eudiomètre ; la tension de la vapeur étant de $17^{mm},4$, on peut regarder ce mélange comme contenant un volume 1 de gaz secs, sous la pression de $760^{mm} - 17^{mm},4$; sous la pression de 760 millimètres, ce volume deviendrait $\frac{760 - 17,4}{760}$; et, si l'on en prend la moitié, on aura, pour la pression de

En retranchant maintenant le poids total du ballon de la poussée qu'il éprouve, on obtiendra la valeur de la force ascensionnelle, savoir

$$350^{gr},542.$$

XLVIII. — *Un thermomètre, préalablement échauffé à 35 degrés, a été porté dans un appartement dont la température est de 10 degrés; au bout de 40 secondes, ce thermomètre s'était abaissé de 1 degré. — Quelle température marquera-t-il au bout de 6 minutes?*

Solution. — Divisons la durée du refroidissement en intervalles égaux, de 40 secondes chacun; les 6 minutes comprendront 9 de ces intervalles. Or, il résulte de la loi générale du refroidissement (835) que les excès successifs de la température du thermomètre sur celle de l'enceinte, observés à des intervalles égaux, décroissent comme les termes d'une progression par quotient; nous connaissons les deux premiers termes de cette progression, savoir 25 et 24, dont le quotient est $\frac{24}{25}$; il sera donc facile de trouver le dixième terme, c'est-à-dire l'excès de la température du thermomètre sur celle de l'enceinte au bout du neuvième intervalle de 40 secondes; ce dixième terme est

$$x = 25\left(\frac{24}{25}\right)^9.$$

Cette valeur de x pourra se calculer par logarithmes; on trouvera ainsi :

$$x = 17^{\circ},31.$$

La température marquée par le thermomètre, au bout de 6 minutes, sera donc de $17^{\circ},31 + 10^{\circ}$, c'est-à-dire de $27^{\circ},31$.

XLIX. — *Une masse d'air qui occupe 50 mètres cubes, à la température de 5 degrés, et dont la fraction de saturation est 0,572, se mélange à une autre masse d'air dont le volume est 75 mètres cubes, la température 15 degrés, et la fraction de saturation 0,480; le volume du mélange est 125 mètres cubes, et sa température est de 11 degrés. Quelle sera la fraction de saturation du mélange? — Les valeurs de la force élastique maximum de la vapeur d'eau à 5 degrés, 15 degrés, 11 degrés, sont respectivement 6,53; 12,70; 9,79.*

Solution. — Dans la première masse d'air, avant le mélange, la force élastique de la vapeur d'eau est, d'après les conditions de l'énoncé, $6,53 \times 0,572$. Donc, lorsque le mélange sera effectué, c'est-à dire lorsque cette vapeur se sera échauffée de 5 degrés à 11 degrés, et qu'elle aura acquis, au lieu du volume de 50 mètres, un volume de 125 mètres, sa force élastique sera

$$6,53 \times 0,572\left[1 + 0,00367\,(11 - 5)\right]\frac{50}{125} = 1^{mm},527.$$

De même, la force élastique de la vapeur contenue dans la seconde masse d'air deviendra, lorsque le mélange sera effectué,

$$12,7 \times 0,48\left[1 - 0,00367\,(15 - 11)\right]\frac{75}{125} = 3^{mm},711.$$

En faisant la somme de ces deux forces élastiques, on obtient la force élastique totale de la vapeur d'eau dans le mélange, savoir 5,238. — Puisque la force élastique maximum à cette température est $9^{mm},79$, la fraction de saturation est

$$\frac{5,238}{9,79} = 0,535.$$

L. — *La terre étant couverte d'une couche de neige à zéro, de 2 centimètres d'épaisseur, quelle est l'épaisseur de la couche de pluie tombant à 12°,5 qui serait nécessaire pour en déterminer la liquéfaction? — Densité de la neige par rapport à l'eau de pluie*, 0,78; *chaleur latente de fusion de la neige*, 79 25.

Solution. — Si la densité de la neige était égale à celle de la pluie, une couche de neige de 1 centimètre d'épaisseur exigerait, pour se fondre, une couche de pluie à 1 degré ayant $79^{cent},25$ d'épaisseur : donc 2 centimètres de neige exigeraient $79^{cent},25 \times 2$ de pluie à 1 degré, ou $\frac{79^{cent},25 \times 2}{12,5}$ de pluie à 12°,5. Mais la neige ne pesant, à volume égal, que les 0,78 de ce que pèse la pluie, on voit en définitive que pour fondre la couche proposée, il suffira d'une quantité de pluie à 12°,5, représentée par

$$0,78 \times \frac{79^{cent},25 \times 2}{12,5} = 9^{cent},89.$$

LI. — *Une couche de neige à zéro, de 1 centimètre d'épaisseur, étant donnée, combien devra-t-elle recevoir de chaleur du soleil, par mètre carré de superficie, pour se répandre dans l'air sous forme de vapeur saturante à 10 degrés? — Densité de la neige*, 0,78; *chaleur latente de vaporisation de l'eau à 10 degrés*, 600.

Solution. — Une couche de neige de 1 centimètre d'épaisseur et de 1 mètre carré de superficie, ayant pour densité 0,78, pèse $7^{k},8$: pour la fondre, à zéro, il faut lui donner $79^{calor},25 \times 7,8$. Pour échauffer, de zéro à 10 degrés, l'eau provenant de la fusion, il faut $10^{cal} \times 7,8$; enfin, pour convertir cette eau en vapeur, il faut encore $600^{cal} \times 7,8$. En ajoutant ces trois nombres, on obtient la quantité de chaleur demandée, savoir :

$$(79,25 + 10 + 600)\,7,8 \quad \text{ou} \quad 567^{calor},15.$$

LII. — *Un litre d'alcool (mesuré à 0°), chauffé dans un vase de laiton du poids 10 grammes, placé dans 1 kilogramme d'eau à 10° contenu dans un vase de laiton poids de 200 grammes, a élevé de 10° à 27° la température de cette eau. — Quelle la chaleur spécifique de l'alcool, sachant que la densité de l'alcool est* 0,8, *et que chaleur spécifique du laiton est* 0,1? (Baccalauréat. Paris, 1867.)

En appliquant les formules données dans le texte (366), on trouvera pour la chal spécifique cherchée 0,64.

LIII. — *Deux morceaux de fer, qui pèsent* $231^{gr},5$ *et* $249^{gr},1$, *ayant été chauffés une température x, on les a plongés dans des masses d'eau dont les poids respectifs sont* 360 *grammes et* 450 *grammes, et les températures* 10 *degrés et* 12 *degrés. Les températures finales des mélanges ont été* 17°,5 *et* 18°, 4. — *On demande la température initiale x et la chaleur spécifique du fer.*

Solution. — On exprimera que la quantité de chaleur perdue par chaque morceau de fer est égale à la quantité de chaleur gagnée par l'eau dans laquelle on l'a plongé. En désignant par c la chaleur spécifique du fer, on a donc les deux équations suivantes :

$$(1) \qquad 231,5 \times c(x - 17,5) = 360 \times 7,5$$
$$(2) \qquad 249,1 \times c(x - 18,4) = 450 \times 6,4.$$

Pour éliminer c, il suffit de diviser membre à membre ces deux équations, ce qui donne

$$\frac{x - 17,5}{x - 18,4} = \frac{360 \times 75 \times 2491}{450 \times 64 \times 2315}.$$

et en simplifiant le second membre et effectuant ensuite les opérations indiquées

$$\frac{x - 17,5}{x - 18,4} = \frac{37565}{37040}, \quad \text{d'où} \quad x = 120°,97.$$

En reportant cette valeur dans l'équation (1), il vient :

$$231{,}5 \times c \times 103{,}47 = 360 \times 7{,}5, \quad \text{d'où } c = 0{,}1127.$$

La température initiale du fer était donc de 120°,97, et la chaleur spécifique du métal est 0,1127.

PROBLÈMES SUR L'ACOUSTIQUE.

LIV. — *Une corde tendue par un poids de 4 kil. rend un son de 200 vibrations par seconde. On demande :* 1° *le nombre de vibrations que rendront les* $\frac{4}{5}$, *les* $\frac{2}{3}$ *et* $\frac{1}{2}$ *de la corde;* 2° *le nombre de vibrations de la corde entière, tendue successivement par 9 kil., 16 kil., 25 kil.;* 3° *le nombre de vibrations de deux autres cordes de même longueur, également tendues, mais dont les poids seraient, pour l'une 4 fois et pour l'autre 25 fois plus considérable.* (Baccalauréat, Poitiers, 1867.)

Solution. — 1° Les nombres de vibrations d'une corde sont, toutes les autres conditions étant égales d'ailleurs, inversement proportionnels à la longueur de cette corde; on a donc

$$\frac{4}{5}x = \frac{2}{3}y = \frac{1}{2}z = 200 \times 1;$$

d'où l'on déduit :

$$x = 250, \; y = 300, \; z = 400.$$

2° Les nombres de vibrations d'une même corde sont directement proportionnels aux racines carrées des poids tenseurs, on a donc :

$$\frac{x}{3} = \frac{y}{4} = \frac{z}{5} = \frac{200}{2};$$

d'où l'on déduit :

$$x = 300, \; y = 400, \; z = 500.$$

3° Les nombres de vibrations de plusieurs cordes sont, toutes circonstances égales d'ailleurs, inversement proportionnels aux racines carrées des densités; on a donc :

$$2x = 5y = 200 \times 1.$$

d'où l'on déduit :

$$x = 100, \; y = 40.$$

LV. — *Le poids spécifique du platine étant pris égal à 22 et celui du fer à 7,8, on demande quel rapport il doit y avoir entre les longueurs de deux fils, l'un en platine, l'autre en fer, et tous les deux de même section, pour qu'ils soient à l'unisson quand on les tend également.* (Baccalauréat, Paris, 1868.)

Solution. — Le nombre de vibrations que rend le premier fil peut être représenté par $\frac{K}{l\sqrt{22}}$; le nombre de vibrations que rend le second par $\frac{K}{l'\sqrt{7,8}}$. Dans ces deux expressions, la constante K est la même.

Divisons la deuxième par la première : il vient

$$\frac{l}{l'} = \sqrt{\frac{7,8}{22}} = \frac{\sqrt{7.8 \times 22}}{22}.$$

On trouve pour valeur approchée de ce rapport 0,5954.

LVI. — *Trouver la longueur du tuyau ouvert dont le son fondamental est à l'unisson avec le diapason normal.*

Solution. — Le diapason normal exécutant 435 vibrations par seconde (659), la longueur de l'onde sonore qu'il excite dans l'air (supposé à zéro) est de $\frac{331^m,3}{435}$. Telle est aussi, par suite, la longueur d'ondulation du son fondamental que rend le tuyau ; et comme elle est double de la longueur L du tuyau lui-même (voir la seconde note de la page 580), on a

$$L = \frac{331^m,3}{435 \times 2} = 0,381.$$

LVII. — *Un tuyau fermé de* 0m,50 *de longueur donne l'harmonique* 3 ; *quel est le rang de cet harmonique dans l'échelle musicale ?*

Solution. — Quand le tuyau proposé donne le son fondamental, la longueur de l'ondulation sonore est de $0^m,50 \times 4$ ou de 2 mètres (note de la page 579) et le nombre des vibrations exécutées dans une seconde est de $\frac{331,3}{2}$ ou de 165,65 ; pour l'harmonique 3, le nombre de vibrations est triple du précédent : il est donc égal à 496,95. — Or si, partant du nombre de vibrations connu de la_3, savoir 435, on calcule successivement les nombres de vibrations de si_3, et de ut_4, on trouve que la note cherchée est comprise entre ces deux dernières ; on peut même reconnaître qu'elle est plus aiguë que si_3 et plus grave que $ut\ \flat_4$.

PROBLÈMES D'OPTIQUE

LVIII. — *Deux miroirs plans* AB *et* CD (*fig.* 677), *inclinés l'un sur l'autre, ont leurs faces réfléchissantes en regard ; un rayon lumineux* SI *se réfléchit d'abord sur* A*suivant* IH, *puis sur* CD *suivant* HR. *Démontrer que l'angle* δ *formé par la direction du rayon incident avec celle du rayon deux fois réfléchi, est toujours double de l'angle* α *des deux miroirs.*

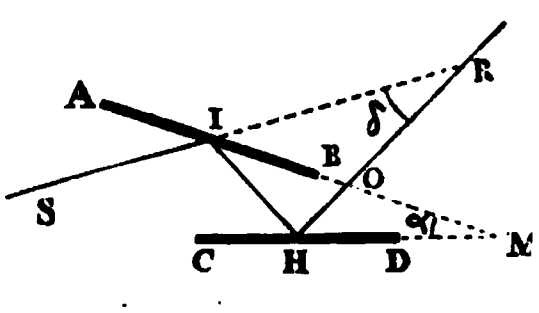


Fig. 677.

Solution. — Les triangles IOR et HOM ont leurs angles en O égaux comme opposés par le sommet ; donc :

$$OIR + \delta = OHM + \alpha.$$

Mais OHM est égal à IHC, à cause de la réflexion sur le miroir CD ; IHC, à son tour, est égal à la somme des angles intérieurs α et HIM ; enfin, ce dernier angle, à cause de la réflexion sur le miroir AB, est égal à SIA, qui lui-même est égal à OIR. On voit donc que

$$OHM = \alpha + OIR ;$$

en ajoutant membre à membre ces deux égalités, et supprimant les parties communes, il vient enfin :

$$\delta = 2\alpha.$$

LIX. — *Un point lumineux* P (*fig.* 563) *est situé sur l'axe d'un miroir concave* M *dont le rayon* CO *est égal à* 1 *mètre ; la distance* PO *est de* 2 *mètres. — On demande déterminer la distance* P'O *de l'image au miroir.*

Solution. — La formule générale qui a été établie (722) fournit immédiatement la solution : il suffit de remplacer, dans l'équation (1), p par 2, et R par 1, ce qui donne

$$p' = \frac{2}{3} = 0^m,666.$$

Si l'on veut traiter directement la question, on pourra raisonner de la manière

vante : la normale IC (*fig.* 563) étant bissectrice de l'angle du rayon incident et du rayon réfléchi, on a :

$$\frac{P'I}{PI} = \frac{P'C}{PC};$$

si l'on suppose l'amplitude du miroir très-petite, on pourra remplacer les deux distances P'I et PI par P'O et PO; la proportion précédente devient alors :

$$\frac{P'O}{PO} = \frac{P'C}{PC};$$

on en déduit facilement :

$$\frac{P'O}{PO} = \frac{P'O + P'C}{PO + PC} = \frac{OC}{PO + PC};$$

d'où

$$P'O = PO\,\frac{OC}{PO + PC} = 2^m\,\frac{1}{2+1} = 0^m,666....$$

LX. — *Une ligne droite lumineuse* AB, *de* $0^m,24$ *de longueur, est placée perpendiculairement à l'axe d'un miroir concave* MON (*fig.* 570). *Le rayon du miroir est de* 1 *mètre et la distance* PO *de* 2 *mètres. — Déterminer la longueur de l'image* A'B'.

Solution. — Les formules générales qui ont été établies (725) fournissent immédiatement la solution : car la relation (2) donne, en désignant par p' la distance de l'image au miroir

$$A'B' = 0^m,24 \times \frac{p'}{2};$$

et en déterminant la valeur de p' comme dans le problème précédent, savoir $p' = \frac{2}{3}$, il vient

$$A'B' = 0^m,24 \times \frac{1}{3} = 0^m,08.$$

Si l'on veut traiter directement la question, on pourra raisonner comme il suit. Les triangles ACB et A'CB' étant semblables, on a :

$$(1) \qquad \frac{A'B'}{AB} = \frac{P'C}{PC};$$

mais, les points P et P' étant des foyers conjugués, on trouverait, en raisonnant comme dans le problème précédent :

$$\frac{P'C}{PC} = \frac{P'O}{PO} = \frac{OC}{PO + PC};$$

en substituant la valeur de ce rapport dans la proportion (1), il vient :

$$A'B' = AB\,\frac{OC}{PO + PC} = 0^m,24\,\frac{1}{2+1} = 0^m,08.$$

LXI. — *Devant un miroir sphérique concave de* 2 *mètres de rayon, on place une flèche lumineuse de* 1 *décimètre de longueur, perpendiculairement à l'axe principal et à* 5 *mètres du miroir. — Où se forme l'image, et quelle en est la grandeur?*

On met ensuite un petit miroir plan au foyer principal du miroir sphérique, incliné de 45° *sur l'axe principal, et la face réfléchissante tournée vers ce miroir. Quelle image formeront les rayons réfléchis par le grand miroir sphérique en tombant sur le petit miroir plan? Quelles en seront la grandeur et la situation? Où placer un écran pour la recevoir, ou bien une loupe pour l'observer et pour l'agrandir?* (Baccalauréat, Paris, 1868.)

d'où l'on déduit facilement

$$PO = 1^m,8.$$

On peut également appliquer les formules données (722 et 725), ce qui conduit plus rapidement au même résultat.

LXIII. — *Un prisme* BAC (*fig.* 679), *dont l'angle réfringent* A *est connu, est rencontré perpendiculairement à l'une de ses faces par un rayon lumineux* RI *qui se réfracte en* H *suivant* HS. *On mesure la déviation* δ *que le rayon subit par cette réfraction. — Déduire de la connaissance des angles* A *et* δ *la valeur de l'indice de réfraction de la substance du prisme.*

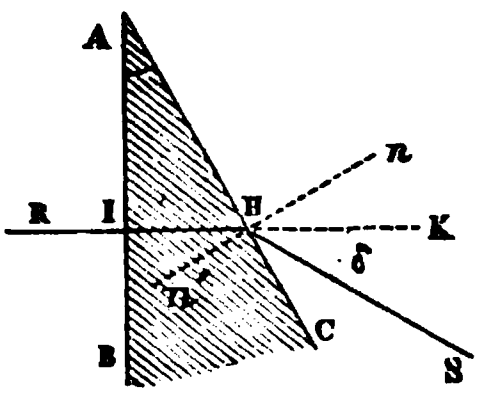


Fig. 679.

Solution. — Soit nn' la normale au point H; on a :

$$\frac{\sin SHn}{\sin RHn'} = n;$$

or, l'angle SH*n* se compose de deux parties, l'une SHK, égale à δ; l'autre KH*n*, égale à A; les angles KH*n* et A ont en effet leurs côtés respectivement perpendiculaires. D'autre part, l'angle RHn', égal à KH*n* comme opposé par le sommet, est aussi égal à A; en substituant, il vient donc :

$$n = \frac{\sin (A + \delta)}{\sin A}.$$

ERRATA

Page 30, ligne 4, *au lieu de :* 3P + *p*, *lisez :* 2P + *p*.

Page 54, ligne 20, *au lieu de :* distance *m'n'*, *lisez :* distance *m'm*.

Page 198, ligne 4, *au lieu de :* 0,00 6361, *lisez :* 0,00 3661.

Page 302, ligne 11, à partir du bas, *au lieu de :* la quantité de chaleur que ce liquide absorbe, *lisez :* la quantité de chaleur qu'absorbe un kilogramme de ce liquide.

Page 398, ligne 23 de la note, *au lieu de :* *d*, 2*d*, 3*d*, 4*d*, lisez : *d*, 2*d* 3*d*, *d*.

TABLE DES MATIÈRES

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

Pages.

NOTIONS DE MÉCANIQUE.

Mouvement en général. 1
Mouvement uniforme. 1
Mouvement varié. 2
Mouvement uniformément varié. . . 3
Principe de l'inertie. 5
Forces. Mesure des forces. 5
Dynamomètres 6
Principes relatifs aux mouvements produits par les forces constantes. 7
Masse. 8
Mesure des forces constantes. 9
Représentation géométrique des forces. 10
Composition des forces. 10
Centre des forces parallèles. 12
Couples 12
Équilibre des forces appliquées à un système invariable. 13
Effets des forces. 13
Égalité de l'action et de la réaction. 14
Travail. — Kilogrammètre. 14

NOTIONS SUR LA CONSTITUTION ET LES DIVERS ÉTATS DES CORPS.

Constitution des corps. Atomes. . . . 15
But de la physique. 16
Divers états des corps. 18

LIVRE PREMIER

PESANTEUR ET HYDROSTATIQUE

CHAPITRE I. — PESANTEUR.

Pesanteur, centre de gravité, chute des corps. 21
Direction de la pesanteur. 21
Poids : centre de gravité. 22
Équilibre des corps solides sous l'action de la pesanteur seule. 24
Intensité de la pesanteur. 25
Chute des corps dans le vide. . . 26
Machine d'Atwood. 27
Appareil de M. Morin. 32
Pendule. 35
Pendule simple. 35
Pendule composé. 37
Isochronisme des petites oscillations. 37
Détermination de l'intensité de la pesanteur 38
Balance. 39
Conditions de justesse. 41
Conditions de sensibilité. 45
Conservation de la balance. 45
Double pesée. 47
Balance hydrostatique. 48

CHAPITRE II. — HYDROSTATIQUE DES LIQUIDES.

Équilibre des liquides. Pressions exercées par les liquides pesants. . . . 49
Principe de la transmission des pressions. Presse hydraulique. 50
Égalité de pression dans tous les sens autour d'un point. 51
Condition d'équilibre d'un liquide pesant. 52

Pages.

Pressions exercées par les liquides pesants. 54
Paradoxe hydrostatique. 57
Application. Tourniquet hydraulique. 58
Liquides superposés. 60
Vases communiquants. 60
Application. Puits artésiens, niveau d'eau, niveau à bulle d'air. . . . 62
Principe d'Archimède. 65
Poussée éprouvée par les corps plongés. 65
Principe des corps flottants. 67
Détermination expérimentale des volumes des corps solides. 68
Capillarité. 69
Ascensions et dépressions capillaires. 70
Note sur le cathétomètre et le vernier. 71

CHAPITRE III. — Poids spécifiques. Aréomètres.

Notions générales. 75
Densités et poids spécifiques. 76
Formules relatives aux poids spécifiques. 76
Détermination des poids spécifiques des corps solides et liquides. . . . 77
Méthode de la balance hydrostatique. 77
Méthode du flacon. 78
Méthode des aréomètres à volume constant. 79
Tables de poids spécifiques. 82
Aéromètres à poids constant. 85
Aréomètres de Baumé et de Cartier. 83
Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac. 85
Volumètres et densimètres 87

CHAPITRE IV. — Pesanteur de l'air et des gaz Baromètre.

Transmission des pressions dans les gaz. 89
L'air et les gaz sont pesants. 89
Condition d'équilibre d'un gaz pesant. 90
Pression atmosphérique, Expérience de Torricelli 90
Effets produits par la pression atmosphérique et par la force élastique de l'air. 93
Baromètre à cuvette. 95
Baromètre de Fortin. 97

Pages.

Baromètre fixe. 99
Baromètre à siphon. 100
Baromètre de Gay-Lussac. 101
Baromètre à cadran. 102
Baromètre métallique. 102
Mesure des hauteurs par le baromètre. 103

CHAPITRE V. — Force élastique des gaz.

Loi de Mariotte. 104
Vérifications expérimentales. 105
Limites de la loi de Mariotte. 107
Applications de la loi de Mariotte. . 111
Mesure de la force élastique des gaz. Manomètres 113
Manomètres à mercure 113
Manomètres métalliques. 116
Mélange des gaz. 117
Loi du mélange des gaz. 118
Mélange des liquides et des gaz. . . 119
Dissolution des gaz dans les liquides. 119
Action des solutions salines sur les gaz. 122
Extension du principe d'Archimède aux gaz. Aérostats. 124
Poussée éprouvée par les corps plongés dans les gaz. 124
Correction des pesées effectuées dans l'air. 125
Aérostats. 126
Force ascensionnelle d'un aérostat. . 127

CHAPITRE VI. — Pompes a gaz et a liquides. — Siphon.

Pompes servant à raréfier les gaz. Machine pneumatique. 132
Pompe à main. 132
Machine pneumatique ordinaire. . . 135
Machine pneumatique de M. Bianchi. 141
Machine pneumatique à mercure. . 145
Machines servant à comprimer les gaz. 146
Applications. Fontaine de compression. Fontaine de Héron. 148
Pompes à liquides. 149
Pompe aspirante. 149
Pompe foulante. Pompe à incendie. . 152
Pompe aspirante et foulante. 153
Pompe aspirante et élévatoire. . . . 154
Description de la presse hydraulique. 156
Siphon. 158
Pipette. 160

LIVRE II

CHALEUR

Pages.

CHAPITRE I. — Dilatation des corps par la chaleur. Thermomètre.

Accroissement de longueur des barres solides, sous l'action de la chaleur. 161
Accroissement de volume des divers corps sous l'action de la chaleur. . 162
Température. Thermomètre. 164
Thermomètre à mercure. 165
Diverses échelles thermométriques. . 169
Thermomètre à alcool. 170
Sensibilité des thermomètres. . . . 171
Du choix des corps employés dans la construction des thermomètres. . 171
Pyromètres. 173

CHAPITRE II. — Mesure des dilatations.

Dilatations des corps solides. 174
Dilatations linéaires. 174
Dilatations cubiques. 178
Dilatations des enveloppes. 180
Dilatation des liquides. 181
Dilatation apparente et dilatation absolue. 181
Dilatation absolue du mercure. . . . 182
Dilatation des autres liquides. Méthode du thermomètre à poids. . . 185
Méthode des thermomètres comparés. 187
Dilatation des liquides très-volatils. . 189
Maximum de densité de l'eau. . . . 189
Dilatation des gaz. 191
Formules générales. 192
Expériences de Gay-Lussac. 193
Expériences de M. Regnault, ... 195

CHAPITRE III. — Applications des dilatations.

Corps solides. Correction des mesures linéaires. 199
Pendules compensateurs. 199
Thermomètre de Breguet. 202
Corps liquides. Corrections barométriques. 202
Correction des volumes. 204
Application du thermomètre à poids à la détermination des températures. 204
Corps gazeux. Thermomètres à air. . 205

Pages.

Corrections à faire subir aux densités déterminées par la méthode du flacon. 207

CHAPITRE IV. — Densités des gaz.

Détermination des densités des gaz par rapport à l'air. 211
Poids spécifiques des gaz par rapport à l'eau. Poids du litre d'air. . . . 215

CHAPITRE V. — Changement d'état des corps.

Fusion et solidification. 219
Lois de la fusion. 219
Chaleur latente de fusion. 221
Lois générales de la solidification. . 221
Cristallisation par voie sèche. . . . 221
Phénomènes de surfusion. 222
Expériences de M. Dufour. 223
Influence de la pression. 224
Dissolution des solides dans les liquides. 225
Mélanges réfrigérants. 226
Cristallisation par voie humide. . . 228
Phénomènes de sursaturation. . . . 229

CHAPITRE VI. — Propriétés des vapeurs.

Vaporisation, ébullition, évaporation. 231
Mesure de la force élastique des vapeurs dans le vide. 231
Vapeurs non saturantes. 232
Vapeurs saturantes. Maximum de tension. 233
Mesure des tensions de la vapeur d'eau aux diverses températures. . 235
Tables numériques. 241
Tension des vapeurs des autres liquides. 242
Mélange des gaz et des vapeurs. . . 244
Loi du mélange des gaz et des vapeurs. 245
Densités des vapeurs. 245
Procédés de M. Dumas. 246
Applications. 248

CHAPITRE VII. — Formation des vapeurs. Condensation des vapeurs et des gaz.

Évaporation. 251

Pages.

Conditions qui influent sur l'évaporation. 251
Froid produit par l'évaporation. . . 252
Applications. 254
Ébullition. 255
Température minimum de l'ébullition sous une pression déterminée. 256
Marmite de Papin. 257
Expériences de M. Donny. 258
Expériences de M. Dufour. 260
Conditions de l'ébullition. 261
Ébullitions dans les circonstances ordinaires. 262
Détermination du point d'ébullition normal. 264
Chaleur latente de vaporisation. . . . 265
Caléfaction. 266
Interprétation des particularités du phénomène. 268
Condensation des vapeurs et des gaz. 269
Condensation par refroidissement. . 270
Condensation par compression. . . . 270
Condensation par refroidissement et par compression. 273
Applications. Appareils de M. Carré. . 274
Distillation. 275
Alambics. 275
Distillations fractionnées. 279

CHAPITRE VIII. — Hygrométrie.

État hygrométrique. 280
Méthode chimique 281
Hygromètre à cheveu, de de Saussure. 283
Hygromètre a condensation. 287
Psychromètre. 290

CHAPITRE IX. — Calorimétrie.

Principes préliminaires. 292

Pages.

Mesure des chaleurs spécifiques. . . 295
Détermination des chaleurs spécifiques des corps solides et liquides. Méthode des mélanges. 294
Chaleurs spécifiques des gaz. 298
Mesure des chaleurs latentes. 300
Chaleur latente de fusion. 300
Chaleur latente de vaporisation. . . 302
Chaleur totale. 304

CHAPITRE X. — Chauffage et machines a vapeur.

Notions sur le chauffage des appartements. 306
Foyers. 306
Cheminées. 307
Chauffage par l'air chaud. 309
Chauffage par circulation d'eau chaude. 309
Chauffage par la vapeur. 310
Chaudière à vapeur. 310
Chaudières à bouilleurs. 311
Appareils accessoires. 312
Chaudières à foyer intérieur. Chaudières tubulaires. 315
Machines à vapeur. 315
Organes principaux. 315
Condenseur. 317
Détente. 318
Tiroir. 319
Machines à basse, moyenne et haute pression. 319
Cheval-vapeur. 320
Organes régulateurs du mouvement. 320
Pompes adjointes à la machine. . . 322
Mouvement du tiroir. Excentrique. . 325
Divers types de machines. 324
Bateaux à vapeur et locomotives. . . 327
Machines à gaz. Machine de M. Lenoir et machine de M. Hugon. 328

LIVRE III

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

CHAPITRE I. — Électricité statique.

Principes fondamentaux. 331
Distinction des électricités. 333
Théories relatives aux deux électricités. 335
Lois des actions électriques. 337
Balance de Coulomb. 337
Loi des distances. 338
Loi des quantités d'électricité. . . . 339
Notions générales sur la déperdition. 340
Distribution de l'électricité sur les corps conducteurs. 341
L'électricité se porte à la surface des corps conducteurs. 341
Étude expérimentale de la distribution. 343
Épaisseur et tension électrique. . . . 345
Pouvoir des pointes. 345
Développement de l'électricité par influence. 347
Expérience fondamentale. 347

Pages.

Étincelle; communication de l'électricité à distance. 349
Mouvements des corps électrisés. . . 350
Électroscopes. Électroscope à feuilles d'or. 352
Machines électriques. 353
Machine ordinaire, de Ramsden. . . 355
Machine de Nairne. 357
Machine hydro-électrique, de M. Armstrong. 359
Électrophore. 361
Machine de M. Holtz. 362
Machine de M. Bertsch. 364
Condensation de l'électricité. Appareils condensateurs. 365
Principes de la condensation. . . . 365
Condensateur à lame de verre. . . . 366
Décharge successive. 368
Décharge instantanée. 369
Bouteille de Leyde. 371
Batteries électriques. 376
Électroscope condensateur de Volta. 377
Effets produits par le passage de l'électricité. 378
Effets mécaniques. 378
Effets calorifiques. 381
Effets lumineux. 382
Effets chimiques. 386
Effets physiologiques. 387

CHAPITRE II. — MAGNÉTISME.

Principes généraux du magnétisme. 389
Aimants naturels et artificiels. . . . 389
Pôles, ligne neutre. 390
Action de la terre sur les aimants. Distinction des deux pôles. 391
Action réciproque des pôles de deux aimants. 392
Hypothèse de l'aimant terrestre. . . 392
Hypothèse des deux fluides magnétiques. 393
Aimantation par influence. Attraction du fer doux par les aimants. . . . 394
Action des aimants sur l'acier. Force coercitive. 395
Répartition des fluides magnétiques dans les corps aimantés. 396
Magnétisme terrestre. 400
L'action de la terre sur l'aiguille aimantée est une action purement directrice. 400
Déclinaison et inclinaison. 402
Boussole de déclinaison. 405
Boussole de Gambey. 405
Méthode du retournement. 406
Boussole marine. Boussole d'arpentage. 407
Boussole d'inclinaison. 408

Pages.

Procédés d'aimantation et conservation du magnétisme. 409
Méthode de la simple touche. 410
Méthode de la touche séparée. . . . 410
Méthode de la double touche. 411
Aimantation par l'action de la terre. 412
Influence de la trempe et de la température sur le magnétisme. . . . 412
Armures et contacts. 413

CHAPITRE III. — ÉLECTRICITÉ VOLTAÏQUE.

Phénomènes généraux. Description des principales espèces de piles. . 415
Électricité dynamique. Production des courants par les actions chimiques. 415
Expériences de Galvani et de Volta. . 417
Interprétation de ces expériences. . 419
Pile de Volta. 420
Modifications principales de la pile voltaïque. 421
Emploi du zinc amalgamé. 424
Emploi des corps oxydants, ajoutés à l'acide de la pile. 425
Piles à courant constant et à deux liquides séparés. 425
Pile de Daniell. 426
Pile de Grove et pile de Bunsen. . . 427
Effets chimiques des courants. . . . 429
Décomposition de l'eau. 429
Décomposition des composés binaires en général. 431
Décomposition des sels oxygénés. . . 432
Théorie de Grotthus et de Faraday. . 432
Lois de Faraday. 434
Effets secondaires. 434
Notions sur les intensités des courants. 436
Mesures des intensités relatives par le galvanomètre. 436
Lois de Ohm. 438
Longueur réduite ou résistance d'un conducteur. 439
Force électro-motrice d'un couple. . 441
Influence de la résistance de l'élément sur l'intensité du courant. . 442
Association en série. 444
Association en batterie. 445
Cas particuliers où il convient d'employer chaque mode d'association. 445
Phénomènes de polarisation; leur intervention dans les piles hydro-électriques. 446
Causes des différences, sous le rapport de la constance, entre les diverses piles hydro-électriques. . . 447
Galvanoplastie. Dorure, argenture et cuivrage galvaniques. 449

Pages.

Galvanoplastie. 449
Appareil simple. 451
Applications industrielles. 451
Dorure et argenture galvaniques. . . 452
Cuivrage galvanique. 453
Effets physiques et physiologiques des courants. 454
Effets caloriques. 454
Effets lumineux. Arc voltaïque. Lumière électrique. 455
Effets physiologiques. 456

CHAPITRE IV. — ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

Expérience d'Œrsted et loi d'Ampère. Construction et usages du galvanomètre. 9 45
Expérience d'Œrsted. Loi d'Ampère. . 459
Multiplicateur de Schweigger. . . . 460
Galvanomètre de Nobili. 461
Graduation du galvanomètre à deux fils. 464
Galvanomètres à gros fils et à fils fins. 465
Action des courants sur les aimants et actions réciproques. 465
Loi de l'action d'un courant rectiligne sur un aimant. 465
Exemples de mouvements imprimés à des aimants par des courants. . 466

CHAPITRE V. — ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

Action des courants sur les courants. 470
Principe des courants parallèles. . . 471
Principe des courants croisés. . . . 472
Principe des courants sinueux. . . . 473
Applications à quelques cas particuliers. 474
Action de la terre sur les courants. . 476
L'action de la terre est assimilable à celle d'un courant indéfini. 476
Conducteurs astatiques. 479
Solénoïdes. Théorie du magnétisme, d'Ampère. 480
Solénoïdes. 480
Théorie du magnétisme d'Ampère. . 481
Application de la théorie d'Ampère à l'explication des phénomènes électro-magnétiques. 485

CHAPITRE VI. — AIMANTATION PAR LES COURANTS. TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE.

Développement du magnétisme par les courants. Électro-aimants. . . 486

Pages.

Aimantation de l'acier par les courants 487
Aimantation du fer doux. Électro-aimants. 488
Applications. Régulateur de la lumière électrique. 491
Télégraphie électrique. 495
Ligne télégraphique. Suppression du fil de retour. 494
Piles employées dans la télégraphie électrique. 495
Télégraphe à cadran, de Breguet. . . 495
Télégraphe de Morse. 499
Télégraphe imprimant de Hughes. . 505
Pantélégraphe Caselli. 504
Sonneries. 506
Paratonnerres pour les appareils des stations télégraphiques. 507
Télégraphie sous-marine. Câbles sous-marins 509
Expériences de M. Varley. 510
Récepteur de M. Thomson pour la télégraphie sous-marine 511

CHAPITRE VII. — COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES.

Courants thermo-électriques dans des circuits formés d'un seul métal. 514
Circuits composés de plusieurs métaux. 515
Couple thermo-électrique 516
Applications à la graduation du galvanomètre. 518
Pile thermo-électrique 518
Aiguilles thermo électriques 520

CHAPITRE VIII. — COURANTS D'INDUCTION.

Phénomènes fondamentaux. 522
Courants volta-électriques 522
Courants magnéto-électriques 524
Courants telluriques. 526
Caractères généraux des courants induits 527
Induction d'un courant sur lui-même. Extra-courants. 527
Courants induits d'ordres supérieurs. 530
Machines d'induction. Effets des courants induits 530
Machine de Clarke 531
Machine de Pixii. 533
Machine de M. Ruhmkorff. 536
Interrupteur de Foucault 538
Effets lumineux des courants induits dans les gaz raréfiés. 53

LIVRE IV

ACOUSTIQUE

Pages.

CHAPITRE I. — Production et propagation du son.

Tout son est est le résultat d'un mouvement vibratoire rapide, excité dans un corps matériel. 543
Le son ne peut se transmettre dans le vide 544
Vitesse du son dans l'air. 545
Vitesse du son dans quelques milieux 546
Ondes sonores. Propagation du son dans un tuyau cylindrique indéfini. 548
Propagation dans un milieu indéfini. Rayons sonores 550
Relation entre la vitesse du son et la longueur de l'onde 552
Qualités du son. Hauteur, intensité, timbre 553
Bruits 553
Détermination du nombre des vibrations d'un son. Sirène 554
Roues dentées 557
Limite des sons perceptibles 558
Réflexion du son. 559
Echos et résonnances. Porte-voix. Cornet acoustique 559

CHAPITRE II. — Intervalles musicaux. Théorie de la gamme et des accords.

Intervalles musicaux. 561
Gamme 561
Accords parfaits. 563
Dièzes et bémols. 564
Gamme mineure. 566
Gamme tempérée 567
Nombre absolu de vibrations des sons de l'échelle musicale 567
Etude optique des intervalles musicaux. Expériences de M. Lissajous. 568

CHAPITRE III. — Vibrations des gaz. Tuyaux sonores.

Les sons rendus par les tuyaux sont dus aux vibrations de l'air intérieur 573
Loi des longueurs 575
Lois des harmoniques 575
Production des nœuds fixes et des ventres fixes. 576
Détermination indirecte de la vitesse du son dans les gaz et dans les liquides 580
Tuyaux à anches. 581
Instruments à vents 582

CHAPITRE IV. — Vibrations des corps solides.

Vibrations des cordes 583
Lois des vibrations transversales. Sonomètre. 583
Harmoniques des cordes 585
Vibrations longitudinales. 587
Instruments à cordes. 588
Vibrations des verges élastiques . . 589
Vibrations transversales. Diapason. 589
Vibrations longitudinales. 591
Détermination indirecte de la vitesse du son dans les solides. 592
Vibrations des plaques et des membranes 595
Harmoniques d'une même plaque; figures nodales. 594
Plaques semblables; lois des dimensions homologues 595
Timbres et cloches. 595
Vibrations des membranes. 596

CHAPITRE V. — Du timbre et de l'audition.

Notions sur le timbre et le renforcement des sons 597
Production simultanée de plusieurs sons par une corde vibrante . . . 597
Causes générales du timbre 598
Renforcement des sons. 599
Emploi des résonnateurs. 601
Timbre des divers instruments et de la voix 602
Synthèse des sons composés 602
Structure et fonction de l'oreille. . 603
Description des parties principales de l'oreille. 605
Fonctions des diverses parties . . . 605

LIVRE V

OPTIQUE

Pages.

CHAPITRE I. — Propagation de la lumière. Photométrie.

Propagation de la lumière 607
Définitions. Hypothèses sur la lumière 607
Propagation rectiligne 608
Problème des ombres 609
Formation des images dans la chambre obscure 610
Vitesse de la lumière 612
Photométrie 613
Intensités relatives des sources lumineuses 613
Photomètre de Foucault 615
— de Rumford 615
— de M. Wheatstone 616

CHAPITRE II. — Réflexion de la lumière.

Phénomènes généraux 617
Lois de la réflexion. Vérifications expérimentales 617
Réflexion à la surface des corps transparents 619
Réflexion irrégulière ou diffusion . . 620
Miroirs plans 620
Images formées par les miroirs plans 621
Miroirs parallèles 622
Miroirs étamés 623
Miroirs inclinés. Kaléidoscope . . . 624
Miroirs sphériques 625
Miroirs concaves. Foyer principal . . 625
Caustiques par réflexion. Aberration de sphéricité 627
Foyers d'un point situé sur l'axe principal 627
Axes secondaires; foyers conjugués sur un axe secondaire 631
Images données par les miroirs concaves 632
Vérifications expérimentales 635
Miroirs convexes 637
Détermination de la distance focale principale d'un miroir sphérique . 639

CHAPITRE III. — Réfraction de la lumière.

Principes généraux 641
Lois de la réfraction 641
Indice de réfraction 642
Principe du retour inverse des rayons 643
Angle limite. Réflexion totale 643
Applications des principes de la réfraction 644
Réfractions atmosphériques. Mirage . 645
Réfraction au travers des prismes . 647
Réfraction d'un rayon lumineux au travers d'un prisme 647
Minimum de déviation 650
Valeurs de quelques indices de réfraction 651
Propriétés des lentilles sphériques . . 652
Lentilles convergentes 655
Foyer principal 655
Caustique par réfraction. Aberration de sphéricité 654
Foyers conjugués 655
Foyers conjugués sur l'axe principal 656
Centre optique 657
Axes secondaires; foyers conjugués sur un axe secondaire 658
Images données par les lentilles convergentes 659
Lentilles divergentes 662
Détermination de la distance focale d'une lentille sphérique 664
Lentilles annulaires de Fresnel. Phares 664

CHAPITRE IV. — Dispersion.

Décomposition et recomposition de la lumière 666
La lumière blanche est composée de sept couleurs principales 666
Les couleurs du spectre sont inégalement réfrangibles 667
Génération du spectre solaire 668
Méthode de Newton pour obtenir un spectre pur 669
Recomposition de la lumière blanche 669
Aberration de réfrangibilité des lentilles. Achromatisme 672
Couleurs complémentaires. Couleurs naturelles des corps 673
Propriétés caloriques, chimiques et phosphorogéniques des rayons du spectre 674
Étude des spectres de diverses origines. Analyse spectrale 675
Raies du spectre solaire 675

Pages.

Spectroscope. 676
Spectres des lumières artificielles. . 678
Analyse spectrale. 679
Expérience du renversement des raies. 679
Interprétation des raies du spectre solaire, d'après M. Kirchhoff. . . . 681
Raies telluriques. 681
Résultats relatifs à l'étude physique des corps célestes. 682

CHAPITRE V. — Structure et fonctions de l'œil.

Structure de l'œil. 683
Actions des diverses parties de l'œil sur les rayons lumineux. 684
Formation des images au fond de l'œil. 685
Vision à différentes distances. Adaptation. 685
Myopie et presbytisme. Besicles. . . 688
Diamètre apparent. Estimation des grandeurs des objets placés à une même distance. 689
Angle optique. Estimation des distances. 690
Evaluation des grandeurs absolues des objets 690
Unité de l'impression produite dans les deux yeux. 691
Appréciation des reliefs. Stéréoscope. 691

Pages.

CHAPITRE VI. — Instruments d'optique.

Instruments sans oculaires, donnant des images réelles. 692
Microscope solaire. 692
Mégascope. 694
Lanterne magique. Fantasmagorie. . 694
Instruments à oculaires, donnant des images virtuelles. 695
Loupe. 695
Microscope composé. 697
Des divers systèmes d'oculaires composés. 701
Lunette astronomique. 702
Lunette terrestre. 707
Lunette de Galilée. 708
Avantages relatifs des divers systèmes de lunettes. 709
Télescope de Newton. 710
Télescope de Foucault. 711
Télescope de Grégory. 713
Avantages relatifs des lunettes et des télescopes. 714

CHAPITRE IX. — Notions sommaires sur la photographie.

Chambre noire pour la photographie. 715
Photographie sur plaque, ou daguerréotypie. 716
Photographie sur papier ou sur verre. 717

APPENDICE AU LIVRE V

Propagation de la chaleur.

Rayonnement. 720
Preuves du rayonnement. 720
Propagation rectiligne; rayons de chaleur. 721
Intensités d'une source à différentes distances, ... 722
Description des appareils employés dans l'étude de la chaleur rayonnante. 722
Émission. Pouvoirs émissifs. 725
Du refroidissement. Loi de Newton. . 726
Réflexion. Pouvoirs réflecteurs. . . . 728
Miroirs ardents. 729
Diffusion. 730
Réfraction et décomposition de la chaleur rayonnante. 731
Pouvoir diathermanes. 732
Absorption. 735
Égalité des pouvoirs émissifs et absorbants. 737
Hypothèse de l'équilibre mobile de température. 737
Conductibilité. 738
Conductibilité des solides. 739
Coefficients de conductibilité. . . . 740
Conductibilité des liquides. 742
Conductibilité des gaz. 745
Applications : lampe de sûreté, conservation des températures. . . . 741

LIVRE VI

MÉTÉOROLOGIE

	Pages.
Répartition de la température à la surface de la terre	747
Observations thermométriques	747
Températures moyennes	748
Variations de la température pendant le jour et pendant l'année	749
Saisons météorologiques	750
Lignes isothermes, isothères et isochimènes	751
Climats	752
Influence de la latitude sur la répartition des températures	753
Climats maritimes et continentaux	755
Rapports entre la température et la végétation	756
Influence de l'altitude sur la température	756
Des vents	757
Causes principales des vents	757
Vents périodiques. Brises. Moussons.	758
Vents constants. Alizés	759
Cyclones. Ouragans	760
Vitesse des vents	761
Variations barométriquess	762
Moyenne barométrique. Influence de la position géographique	763
Météores aqueux	763
Variations de l'état hygrométrique de l'air	764
Rosée	764
Brouillards. Nuages	766
Pluie. Neige. Grêle	768
Électricité atmosphérique	769
Électroscope de de Saussure	769
Etat électrique de l'atmosphère par un temps serein	770
Etat électrique des nuages	771
Eclairs. Tonnerre. Coups de foudre	772
Effets produits par la foudre	774
Paratonnerres	775
Variations du magnétisme terrestre	778
Variations de la déclinaison et de l'inclinaison en un même lieu	778
Lignes construites pour représenter les déclinaisons et les inclinaisons moyennes à la surface du globe	779
Météores lumineux	780
Arc-en-ciel	781
Halos	783
Cercles parhéliques. Parhélies	784
Couronnes	784
PROBLÈMES	785
ERRATA	810

FIN

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.